

**DETERMINACION DE LOS EFECTOS DE AGREGADOS EN MEZCLAS DE CAUCHO AUTO
EXTINGUIBLE**

ANGIE KINET RIOBAMBA CALVACHE

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA DE QUIMICA
PAMPLONA**

2017

DQS is member of:



*Formando líderes para la construcción de un
nuevo país en paz*

**DETERMINACION DE LOS EFECTOS DE AGREGADOS EN MEZCLAS DE CAUCHO AUTO
EXTINGUIBLE**

ANGIE KINET RIOBAMBA CALVACHE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química

Director Universidad de Pamplona:

Dr. EDWIN GUSTAVO FUENTES ORDOÑEZ

Director Práctica Icobandas S.A:

ING. HUGO ARISTIZABAL ALZATE

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

INGENIERÍA DE QUIMICA

PAMPLONA

2017

DQS is member of:



*Formando líderes para la construcción de un
nuevo país en paz*

DEDICATORIA

Primeramente doy gracias a Dios, fuente de inspiración en mis momentos difíciles, en mis aciertos y reveses, por darme ese sentimiento de tranquilidad, alegría y serenidad en cada momento de ésta etapa de mi vida que está próxima a terminar. Por haberme permitido llegar hasta este punto con su infinito amor y bondad, sin los cuales no hubiese sido posible culminar esta etapa de mi vida.

A mi madre Mireya Calvache por su constante apoyo y amor incondicional, cuya presencia en mi vida significó llenarme de esperanza y motivos para seguir adelante siempre, para levantarme después de cada tropiezo y mi motor para terminar este trabajo.

A mi hijo David Suarez, que es mi orgullo, mi gran motivación, mi impulso para terminar mi carrera y ofrecerle lo mejor, quizás si no te tuviera mi vida sería diferente pero desde que estás conmigo soy una mejor persona, pensando siempre en superarme día a día para ser mejor para ti.

A mi querido esposo Wilmer Suarez, que a pesar de la distancia siempre me brindó un amor sin límites en todo momento, apoyándome y aconsejándome siempre.

A mis hermanas y cuñado, Dalila Riobamba, Carmen Riobamba y Guillermo Pantoja por su amabilidad, consejos, apoyo y demás ayudas en el transcurso de este proceso. Sin todas estas ayudas no hubiera sido posible terminar mi trabajo.

DQS is member of:



*Formando líderes para la construcción de un
nuevo país en paz*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa Icobandas S.A por brindarme la oportunidad de trabajar y aprender las responsabilidades que esta carrera asume.

A mi jefe directo el Ingeniero Hugo Aristizabal por haberme colaborado y enseñado de la mejor manera posible, por haberme tenido paciencia y haber confiado en mí.

A mi director de trabajo de grado Edwin Fuentes, por su esfuerzo y dedicación, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y motivación, por sus aportes, ayudas y correcciones en el transcurso de éste trabajo logrando que pueda terminar mis estudios con éxito.

Finalmente agradezco a los docentes de la Universidad de Pamplona por todos los conocimientos brindados a lo largo de la carrera para convertirme en una profesional, por su tiempo, dedicación y por su pasión por la actividad docente.

DQS is member of:



*Formando líderes para la construcción de un
nuevo país en paz*

CONTENIDO

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	1
1.1 INTRODUCCION	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION	2
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
2. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE	6
2.1 MARCO TEÓRICO	6
2.1.1 MINERÍA	6
2.1.2. BANDAS TRANSPORTADORAS	6
2.1.3. NORMAS QUE RIGEN EL USO DE BANDAS TRANSPORTADORAS:	10
2.1.4. CAUCHO	11
2.1.5. FORMULACIÓN DE MEZCLAS DE CAUCHO	12
2.1.6. MODELO DE LAS FASES	13
2.1.7. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES PARA LA MEZCLAS CON CAUCHO	14
2.1.8. PROPIEDADES MECANICAS DEL CAUCHO VULCANIZADO	21
2.2. ESTADO DEL ARTE	24
2.2.1. ANTECEDENTE DE INVESTIGACIÓN	24
2.2.2. EL CAUCHO EN COLOMBIA	24
2.2.3. INVESTIGACIONES RELACIONADAS EN LOS EFECTOS DE AGREGADOS EN MEZCLAS DE CAUCHO Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS	25
3. METODOLOGIA	28
3.1 Localización	28
3.2 Equipos	28

3.3 Materiales y reactivos	29
3.4 Métodos	30
3.4.1. FORMULACION DE LA MEZCLA PATRON	31
3.4.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	36
3.5. EXPERIMENTACIÓN DE MEZCLAS.....	37
3.6. VULCANIZACION DEL CAUCHO	37
4. RESULTADOS Y ANALISIS	47
5. CONCLUSIONES	104
6. RECOMENDACIONES	105
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

DQS is member of:



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de Experimentos. Fuente: Autor	36
Tabla 2. Resultados obtenidos del análisis TGA. Fuente: Universidad de Pamplona	49
Tabla 3. Propiedades mecánicas muestra comercial. Fuente: Icobandas S.A	53
Tabla 4. Base elastómera. Fuente: Autor	54
Tabla 5. Agentes reforzantes. Fuente: Autor	54
Tabla 6. Sistema de vulcanización. Fuente: Autor	55
Tabla 7. Antidegradantes. Fuente: Autor	55
Tabla 8. Retardantes de llama. Fuente: Autor	56
Tabla 9. Lubricantes. Fuente: Autor	56
Tabla 10. Datos abrasión ensayo 1. Fuente: Icobandas S.A.....	58
Tabla 11. Resistencia a la fatiga ensayo 1. Fuente: Icobandas S.A	60
Tabla 12. Datos abrasión ensayo 2. Fuente: Icobandas S.A.....	62
Tabla 13. Resistencia a la fatiga ensayo 2. Fuente: Icobandas S.A	63
Tabla 14. Datos abrasión ensayo 3. Fuente: Icobandas S.A.....	64
Tabla 15. Datos abrasión ensayo 4. Fuente: Icobandas S.A.....	66
Tabla 16. Datos abrasión ensayo 5. Fuente: Icobandas S.A.....	68
Tabla 17. Datos abrasión ensayo 6. Fuente: Icobandas S.A.....	70
Tabla 18. Datos abrasión ensayo 7. Fuente: Icobandas S.A.....	72
Tabla 19. Resistencia a la fatiga ensayo 7. Fuente: Icobandas S.A	74
Tabla 20. Datos abrasión ensayo 8. Fuente: Icobandas S.A.....	75
Tabla 21. Datos abrasión ensayo 9. Fuente: Icobandas S.A.....	77
Tabla 22. Resistencia a la fatiga ensayo 9. Fuente: Icobandas S.A	79
Tabla 23. Datos abrasión ensayo 10. Fuente: Icobandas S.A.....	79
Tabla 24. Resistencia a la fatiga ensayo 10. Fuente: Icobandas S.A	81
Tabla 25. Datos abrasión ensayo 11. Fuente: Icobandas S.A.....	82
Tabla 26. Resistencia a la fatiga ensayo 11. Fuente: Icobandas S.A	84
Tabla 27. Datos abrasión ensayo 12. Fuente: Icobandas S.A.....	86
Tabla 28. Resistencia a la fatiga ensayo 12. Fuente: Icobandas S.A	87
Tabla 29. Comparación de resultados entre formulaciones. Fuente: Autor	90
Tabla 30. Factores del diseño de experimentos ortogonal. Fuente: Autor	91
Tabla 31. Diseño de experimentos. Fuente: Autor	91

Tabla 32. ANOVA del diseño de experimentos. Fuente: Autor.....	93
Tabla 33. Factor de confianza del diseño de experimentos. Fuente: Autor	94
Tabla 34. Factores del diseño de experimentos. Fuente: Autor	95
Tabla 35. Diseño de experimentos para la propiedad de dureza. Fuente: Autor.....	96
Tabla 36. Factor de confianza para el diseño de experimentos. Fuente: Autor	96
Tabla 37. Factores del diseño de experimentos. Fuente: Autor	97
Tabla 38. Diseño de experimentos para la propiedad de resistencia a la fatiga. Fuente: Autor	98
Tabla 39. Factor de confianza para el diseño de experimentos de la propiedad de resistencia a la fatiga. Fuente: Autor	98
Tabla 40. Comparación de propiedades con bandas comerciales. Fuente: Autor	100

DQS is member of:



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pelado en T. Fuente:(“Peel and Adhesion Testing KC Knowledge Centre Test Types Knowledge Centre,” 2016)	23
Figura 2. Diagrama de flujo para las fases metodológicas. Fuente: Autor	31
Figura 3. Mezclado de la base elastómera en el molino. Fuente: Icobandas S.A	38
Figura 4. Incorporación de los compuestos a la base elastómera. Fuente: Icobandas S.A	39
Figura 5. Molde de abrasión. Fuente: Icobandas S.A.....	40
Figura 6. Molde flex. Fuente: Icobandas S.A.....	40
Figura 7. Prensa de vulcanización. Fuente: Icobandas S.A	41
Figura 8. Abrasímetro ABRASION TESTER. Fuente: Icobandas S.A	42
Figura 9. Durómetro PTC 306 L. Fuente: Icobandas S.A	43
Figura 10. Reómetro Monsanto 100 S. Fuente: Icobandas S.A.....	44
Figura 11. Flex cracking tester. Fuente: Icobandas S.A.....	45
Figura 12. Máquina de adhesiones. Fuente: Icobandas S.A	46
Figura 13. TGA de una muestra Comercial de una banda transportadora. Fuente: Universidad de Pamplona	48
Figura 14. Curva DSC de la banda transportadora. Fuente: Universidad de Pamplona	50
Figura 15. Espectro FTIR de la banda transportadora. Fuente: Universidad de Pamplona	51
Figura 16. Prueba resistencia al fuego etapa final ensayo 1. Fuente: Icobandas S.A	57
Figura 17. Reometría del ensayo 1 durante 30 minutos. Fuente: Icobandas S.A.....	59
Figura 18. Reometría ensayo 2. Fuente: Icobandas S.A.....	63
Figura 19. Reometría ensayo 3. Fuente: Icobandas S.A.....	65
Figura 20. Reometría ensayo 4. Fuente: Icobandas S.A.....	67
Figura 21. Reometría ensayo 5. Fuente: Icobandas S.A.....	69
Figura 22. Reometría ensayo 6. Fuente: Icobandas S.A.....	71
Figura 23. Reometría ensayo 7. Fuente: Icobandas S.A.....	73
Figura 24. Resistencia a la fatiga ensayo 7. Fuente: Icobandas S.A	74
Figura 25. Reometría ensayo 8. Fuente: Icobandas S.A.....	76
Figura 26. Reometría ensayo 9. Fuente: Icobandas S.A.....	78
Figura 27. Reometría ensayo 10. Fuente: Icobandas S.A.....	80

Figura 28. Resistencia a la fatiga ensayo 10. Fuente: Icobandas S.A	81
Figura 29. Reometría ensayo 11. Fuente: Icobandas S.A.....	83
Figura 30. Resistencia a la fatiga ensayo 11. Fuente: Icobandas S.A	84
Figura 31. Reometría ensayo 12. Fuente: Icobandas S.A.....	87
Figura 32. Resistencia a la fatiga ensayo 12. Fuente: Icobandas S.A	88

DQS is member of:



RESUMEN

TITULO: DETERMINACION DE LOS EFECTOS DE AGREGADOS EN MEZCLAS DE CAUCHO AUTO EXTINGUIBLE. ¹

AUTOR: Angie Kinet Riobamba Calvache. ²

PALABRAS CLAVES: caucho, resistencia al fuego, resistencia a la abrasión, banda transportadora, minería subterránea, formulación, agregados.

DESCRIPCIÓN

La empresa Icobandas S.A en su mejoramiento continuo y creación de nuevos productos, decidió dar inicio a la investigación de bandas transportadoras para el uso en minería subterránea, debido a los riesgos que se han presentado en los últimos años con el uso de bandas transportadoras en minería subterránea.

En el desarrollo de este trabajo se documentó y se realizó una formulación para caucho autoextinguible que cumpla con unas propiedades mecánicas estándar, con el propósito de ofrecer a los clientes un servicio adecuado, basado en la investigación y experimentación para que cumpla la normativa internacional (ISO 340) que rige la implementación de bandas transportadoras ignífugas en minería subterránea.

En este trabajo se realiza una metodología que empieza desde una selección cuidadosa de ingredientes a emplear para poder obtener un material con propiedades ignífugas, además de propiedades como resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga.

La medición de estas propiedades se da inicio con la propiedad de resistencia al fuego la cual se realiza basándose en la norma ISO 340 que consiste en colocar una muestra de caucho expuesta a llama durante un minuto y evaluar el tiempo que tarda en apagarse después de eliminada la fuente de llama, luego se debe evaluar la resistencia al

desgaste por medio de la pérdida de peso del material en un rango específico de ciclos del abrasímetro, al aumentar este índice disminuye la resistencia al desgaste., finalmente se realiza una prueba de resistencia a la fatiga y adhesión, en la primera se evaluó el fallo debido a cargas repetitivas; que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura y la segunda se realiza para determinar la fuerza de adherencia del material o la fuerza de la unión adhesiva entre dos materiales, en este caso la adherencia entre el caucho y la lona.

Con respecto a la propiedad de resistencia al fuego se concluye que empleando 70 phr de trihidrato de alúmina se observa el efecto ignífugo y se nota poco deterioro en las muestras de caucho, en cuanto a la propiedad de abrasión se concluyó que se tiene una buena abrasión empleando grandes cantidades de negro de humo, pero que esta propiedad se ve afectada con grandes cantidades de retardantes de llama tales como el trihidrato de alúmina y borato de zinc. También se tiene que al aumentar la cantidad de carga química a la matriz de caucho aumenta la dureza y disminuye la abrasión.

Finalmente se define una formulación que cumpla con todas las propiedades ya mencionadas y se establece como la nueva fórmula de caucho autoextinguible para la empresa Icobandas S.A.

ABSTRAC

TITLE: DETERMINATION OF THE EFFECTS OF AGGREGATES IN SELF EXTINGUISHING RUBBER MIXTURES. ¹

AUTHORS: Angie Kinet Riobamba Calvache. ²

KEY WORD: caucho, resistencia al fuego, resistencia a la abrasión, banda transportadora, minería subterránea, formulación, agregados.

DESCRIPTION

The company Icobandas SA in its continuous improvement and creation of new products, decided to start the investigation of conveyor belts for use in underground mining, due to the risks that have occurred in recent years with the use of conveyor belts in mining Underground.

In the development of this work, a formulation for self-extinguishing rubber that complies with standard mechanical properties was documented and carried out with the purpose of offering customers an adequate service based on research and experimentation to comply with international standards (ISO 340) that governs the implementation of fire-retardant conveyors in underground mining.

In this work, a methodology is developed that starts from a careful selection of ingredients to be used to obtain a material with fire retardant properties, as well as properties such as wear resistance and fatigue resistance.

The measurement of these properties starts with the fire resistance property which is based on the ISO 340 standard which consists of placing a rubber sample exposed to flame for one minute and evaluating the time it takes to shut down after being eliminated The flame source, then the wear resistance must be evaluated by means of

the loss of weight of the material in a specific range of cycles of the abrasimeter, increasing this index decreases the resistance to wear. Fatigue and adhesion, the first one evaluated the failure due to repetitive loads; Which includes the initiation and propagation of a crack or set of cracks to the final failure by fracture and the second is performed to determine the adhesion strength of the material or the strength of the adhesive bond between two materials, in this case the adhesion between the Rubber and canvas.

With respect to the property of fire resistance it is concluded that using 70 phr of alumina trihydrate the fire effect is observed and there is little deterioration in the rubber samples, in terms of the abrasion property, it was concluded that there is a good abrasion Employing large amounts of carbon black, but this property is affected with large amounts of flame retardants such as alumina trihydrate and zinc borate. It is also necessary to increase the amount of chemical load to the rubber matrix increases hardness and reduces abrasion.

Finally a formulation is defined that complies with all the properties already mentioned and is established as the new formula of self-extinguishing rubber for the company Icobandas S.A.

DQS is member of:



1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 INTRODUCCION

Icobandas S.A es una empresa colombiana, creada con el objeto de atender las necesidades de bandas transportadoras y de transmisión, tanto del mercado nacional como de los países de su área de influencia. Su misión tiene como propósito atender las necesidades del mercado mediante permanente control de las materias primas, de los procesos y de los productos terminados, garantiza el cumplimiento de los requisitos de sus clientes, siendo competitivos en cuanto a costos y calidad, siempre buscando brindar satisfacción y beneficio a sus trabajadores, accionistas, proveedores y a la sociedad en general.

La planta de Icobandas S.A está ubicada en Popayán-Cauca, en el Valle de Pubenza, entre la cordillera occidental y central al sur occidente del país, creada desde el año 1973 ha incrementado constantemente su participación en el mercado latinoamericano, debido a la alta calidad de sus productos. El rápido crecimiento de la empresa fue consecuencia directa de esa calidad, lograda mediante la permanente transferencia de tecnologías europeas y americanas, además de un excelente servicio de venta y post-venta.

La empresa en la búsqueda de innovación y mejoramiento de sus productos desde la parte de investigación y desarrollo decidió apostarle a una nueva formulación de caucho autoextinguible que brinde mejores resultados y propiedades ignifugas que la formula ya existente. La utilización de bandas transportadoras con propiedades ignifugas se hace necesaria en minería subterránea con el fin de disminuir el grado de peligro que existe en la práctica de la minería subterránea, por lo tanto es importante la creación de un caucho que cumpla con la normativa existente para minería subterránea y que brinde una mayor seguridad en el momento de realizar este tipo de práctica.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION

La minería es una de las actividades más antiguas y peligrosas de la humanidad, debido a condiciones de riesgo presentadas en la extracción de minerales o combustibles. Esta peligrosidad es mayor cuando se trata de minería subterránea porque es aquí donde generalmente suceden accidentes y además se pueden contraer una serie de enfermedades laborales. En todas las minas se produce polvo, y su inhalación puede causar diversas enfermedades pulmonares, como la silicosis o neumoconiosis en las minas de carbón, la asbestosis y otras. De igual forma, en las minas pueden aparecer gases tóxicos y/o explosivos como sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono, metano, entre otros, los cuales han generado la mayoría de accidentes en minería subterránea registrados en el mundo.

En Colombia se presentan accidentes con un gran número de muertos, en el 2011 ocurrió una explosión por acumulación de metano en la mina La Preciosa en el municipio de Sardinata (Norte de Santander), que dejó según lo reportado por el periódico El Tiempo una cifra de 21 mineros muertos, los últimos muertos de La Preciosa pues terminó con el cierre de ésta después de 4 accidentes reportados en años anteriores. (Peñaloza, 2011)

Otro factor de riesgo que se presenta tanto en la minería a cielo abierto como en la minería subterránea es el flujo de la energía eléctrica pues es ésta la energía más adecuada para mover los diferentes sistemas de transportes, arranque, ventilación, perforación, etc. Esta energía eléctrica es de fácil transporte y gran rendimiento pero en su funcionamiento produce chispas y calentamientos peligrosos según la atmósfera. Acompañado de esto se tiene el transporte de material extraído que se realiza generalmente en bandas transportadoras de caucho las cuales se han hecho indispensables para mover el mineral durante su procesamiento en la faena minera, y sus capacidades de operación han ido mejorando con el pasar del tiempo, buscando de esta forma un bajo costo por tonelada transportada.

Uniando todos los riesgos mencionados anteriormente tenemos que en caso de producirse chispa se tienen inconvenientes tales como el riesgo de incendio, explosión y demás que

junto con los gases inflamables producirán un accidente sin duda alguna, a esto podemos sumarle que la banda transportadora es de caucho es decir el incendio se propagaría por toda la mina acabando con la vida de los mineros. Por tanto se puede decir que tener una banda transportadora para el material extraído no solo traería ventajas sino también desventajas como la propagación de incendios, esto conlleva a preguntarse ¿Por qué no se realiza una banda transportadora auto extingible, que ofrezca una estabilidad química y mecánica al momento de estar en operación?

La minería en Colombia cuenta con una facilidad de producción debido a que tiene una excelente geografía, y se disponen actualmente productos mineros como carbón, níquel, sal, esmeralda, oro, platino entre otros, presentando un significativo aporte al PIB del país. Uno de los tantos recursos mineros que posicionan al país como potencia minera mundial, es el carbón. Colombia es el primer productor de éste mineral de América Latina, décimo en el mundo y el cuarto exportador a nivel mundial. Las reservas están valoradas en aproximadamente 17000 millones de toneladas, éste mineral energético se encuentra principalmente en regiones como la Guajira y la cuenca del Cesar. El país también se destaca por su producción de níquel, ubicándose como la segunda fuente de ingreso por concepto de exportaciones del sector minero. En el caso del oro, el país está siendo examinado por empresas que han hecho descubrimientos potenciales de importantes yacimientos auríferos en el Sur de Bolívar, Antioquia, Cauca, Santander, Tolima, etc. La minería es uno de los sectores económicos más fuertes y se ha convertido en pilar de la economía colombiana, al promover el crecimiento económico y la inversión extranjera directa, beneficiando al Gobierno Nacional, a las regiones y a la sociedad en general. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

La importancia de la minería radica en que la sociedad emplea materiales obtenidos mediante minería, o requieren productos mineros para su fabricación. Se puede afirmar que si un material no viene de una planta, entonces es que se obtiene de la tierra, pues todas las actividades como la agricultura, pesca y silvicultura no podrían llevarse a cabo sin herramientas, máquinas y fertilizantes desarrollados con los productos de las minas. (Ministerio de Minas y Energía, 2009)

La minería es rentable económicamente, es motor de desarrollo y riqueza para la sociedad pues genera empleo, desarrollo social, cultural y de infraestructura pero así como es rentable se sabe que tiene un alto riesgo, pues al ejercer la actividad minera se coloca en peligro la vida de los mineros, debido a todos los peligros que esta genera, pero aun así se pueden tomar las medidas necesarias para hacer de la minería una actividad más rentable y de bajo riesgo, tomando las medidas necesarias para evitar accidentes en las minas. Los factores a tener en cuenta son contar con unos adecuados elementos de protección personal para los mineros, buena ventilación, revisión constante al flujo de electricidad, mantenimiento permanente de equipos, y demás. Se puede añadir también que se puede facilitar la actividad minera por medio de bandas transportadoras que ayuden a sacar el mineral extraído de la mina y también se podría hacer que lo transporte hasta el lugar de almacenamiento; pero como se sabe las bandas son realizadas a partir de caucho el cual en caso de incendio arde con mucha facilidad, favoreciendo la propagación de éste y elevando el riesgo en la minería subterránea, además de ser tan combustible, un incendio que se propague por medio de caucho es difícil de apagar, surgiendo así la necesidad de crear una banda transportadora que no solo ayude a transportar el material extraído y aumente los riesgos ya existentes, sino una banda transportadora que sea auto extingible para que en caso de un incendio en la mina la banda se apague evitando así la propagación de incendios.

Se sabe que existen normativas en todo el mundo para eliminar o minimizar los riesgos para el personal y otras partes interesadas que pueden estar expuestas a peligros de seguridad y salud ocupacional asociados con sus actividades, en nuestro país tenemos una Norma Técnica Colombiana NTC – OHSAS 18001:2007 la cual corresponde a un Sistema de Seguridad y Salud Ocupacional que debe ser implementada en cualquier empresa como una parte importante para mejorar la gestión de riesgos, permitiendo adaptarse de manera eficiente a cualquier cambio legislativo y además permitir proteger a todo su personal. La creación y uso de una banda transportadora auto extingible deberá minimizar riesgos en la minería subterránea, y como será diseñada para transportar material mineral con alto riesgo de incendio debe ser resistente al fuego cumpliendo la norma DIN en ISO 340:2007, brindando de esta manera mayor seguridad a los operarios de las minas subterráneas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

1. Formular composiciones de bandas transportadoras para mejorar su resistencia a la propagación del fuego, manteniendo unas propiedades mecánicas estándar.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Aplicar a las formulaciones de las bandas, compuestos con funciones de retardantes de llama.
2. Realizar análisis de las formulaciones respecto a la inflamabilidad y propiedades mecánicas.
3. Optimizar una formulación desarrollada teniendo en cuenta parámetros de calidad de la normativa Colombiana.

2. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 MINERÍA

Es una técnica u actividad productiva mediante la cual se extraen minerales de la corteza terrestre que se han acumulado en el suelo o subsuelo en forma de yacimientos, éstos minerales que son básicos para la producción de materiales empleados por la sociedad moderna y que son básicos en el diario vivir. (Ministerio de Minas y Energia, 2009)

Existen dos tipos de minería según el material que exista en su interior y del modo de extracción del mismo que se emplee para obtenerlo, éstos son:

A cielo abierto: Extracción que se realiza a nivel de la tierra, y se desarrolla en forma progresiva por capas o terrazas en terrenos delimitados. Se realiza en lugares donde los minerales están a poca profundidad.

Subterráneas: Se basa en la excavación bajo tierra por medio de túneles ya sean verticales u horizontales. Los túneles deben tener un sistema de ventilación que lleva aire fresco a los mineros y evita la inhalación de gases peligrosos. (Amstrong & Menon, 2001)

En todas las minas se realizan tres procedimientos generales:

- a. *Tombe o arranque:* Realización de acciones necesarias para separar el material de interés. Este proceso se realiza por tres medios que son máquinas, herramientas o explosivos.
- b. *Carga o rezagado:* Proceso de recolección de la roca extraída y su posterior conducción a un medio ya establecido el cual se encargara de su transporte. Este proceso se realiza por medio de diferentes maquinas u operarios.
- c. *Acarreo o transporte:* Acción por la que el material extraído es conducido fuera de la mina. Este puede ser realizado por camiones, trenes, bandas transportadoras, entre otros. (Viera Flores, n.d.)

2.1.2. BANDAS TRANSPORTADORAS

Para el caso de las bandas transportadoras, se saben que éstas son de gran importancia, pues actualmente ayudan en el procesamiento de un producto industrial, agrícola y minero que están sujetos a diferentes movimientos, ya sea en sentido vertical, horizontal e inclinado. Para cumplir esta función son utilizadas las bandas transportadoras, desempeñando su rol en los diferentes procesos industriales y esto se debe a razones como: las grandes distancias a las que se efectúan los movimientos, su fácil adaptación al terreno, su gran capacidad de transporte, la posibilidad de transportar diversos materiales, etc. (Baeza, 2015)

Materiales a transportar, tamaños y temperaturas: Las bandas transportadoras se emplean principalmente en las industrias extractoras, como minas subterráneas y a cielo abierto, canteras y graveras, industrias siderúrgicas, centrales térmicas, instalaciones de almacenamiento, industrias fertilizante y entre otros. Entre los materiales a transportar la dimensión de los trozos o partículas varía desde materiales pequeños hasta materiales de gran tamaño. Las bandas transportadoras trasladan materiales diversos por ejemplo materiales empleados en la construcción (arcilla, arena, asfalto, caliza, cemento, cenizas, granito, hormigón, tierra, etc), combustibles (antracita, coque, carbón, hulla, lignito, etc), fertilizantes (fosfato, guanos, nitratos, sulfatos, sales, urea, etc), minerales (aluminio, azufre, cobre, hierro, grafito, plomo, yeso, magnesio, etc), alimentos y productos de origen vegetal (azúcar, aceitunas, algodón, café, cacao, guisantes, harinas, maíz, nueces, remolachas, etc). (Salinero Gervaso, 2013)

2.1.2.1. COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA BANDA TRANSPORTADORA

La función principal de la banda es soportar el material a transportar y desplazarlo desde el punto de partida hasta el de descarga. La banda debe ser capaz de cumplir funciones como: absorber las tensiones desarrolladas de arranque, transportar la carga, absorber la energía de impacto en punto de carga, resistir a los efectos de temperatura y agentes químicos, cumplir con los requisitos de seguridad como la resistencia al fuego, también el aspecto económico porque cuando aumenta la longitud, también crece el costo de la banda. Con respecto a esto se tiene que existen varios tipos de bandas que se pueden clasificar de la siguiente manera: (Salinero Gervaso, 2013)

Según el tipo de tejido:

1. De algodón
2. De tejidos sintéticos
3. De cables de acero

Según la disposición del tejido:

4. De varias capas
5. De tejido sólido

Según el tipo de superficie portante de la carga:

6. Lisas
7. Rugosas
8. Con bordes laterales vulcanizados

Constitución de la banda: la banda está sometida a la acción de las siguientes influencias:

1. De las fuerzas longitudinales, que producen alargamientos.
2. Del peso del material, que producen flexiones locales a consecuencia de la adaptación de la banda a la terna de rodillos.
3. De los impactos del material que producen erosiones sobre la misma.

Por tanto los componentes elementales de una banda transportadora para cumplir sus funciones principales de diseño serán: una banda transportadora con tejido, carcasa y recubrimiento, rodillos y soportes, tambores, tensores de bandas, bastidores. Para soportar adecuadamente estas influencias, la banda está formada por dos componentes básicos, el primero el tejido o carcasa que transmite los esfuerzos; y el segundo que soportan los impactos y erosiones. (Baeza, 2015)

Carcasa: la carcasa está constituida por la urdimbre o hilos longitudinales y por la trama o hilos transversales. La urdimbre es la que soporta los esfuerzos de tracción longitudinales, es más resistente que la trama, la cual solo soporta esfuerzos transversales secundarios derivados de la adaptación a la forma de artesa y de los producidos por los impactos. La rigidez transversal de la trama, no debe ser excesiva para que pueda adaptarse bien a la artesa formada por los rodillos. El número mínimo de telas a tener en cuenta es de 3, éste

tejido de las telas está embebido en goma virgen, y a su vez el conjunto de telas se unen entre sí con la misma goma virgen. (Salinero Gervaso, 2013)

Recubrimientos: Los recubrimientos por su parte están formados por elastómeros (caucho natural), PVC o demás materiales. El espesor del recubrimiento de la carcasa se diseña en función del tipo de aplicación de la banda y de la anchura de ésta. Los recubrimientos de goma por ejemplo sirven para unir los elementos constitutivos de la carcasa y constan de dos partes, la superior y la inferior. El recubrimiento superior es el que soporta el material, el inferior es el que está en contacto con los rodillos, por ello, el recubrimiento superior tendrá un espesor mayor al recubrimiento inferior. (Baeza, 2015)

Tejidos: En la actualidad para el diseño de una banda se emplean tejidos como algodón, rayón, poliéster, poliamida, cable de acero. Los tejidos naturales como el algodón son empleados muy poco pues se sustituyeron por tejidos sintéticos como el rayón, poliéster, poliamida y el cable de acero. De estos tejidos el más usado es el poliéster (E) para la urdimbre y la poliamida (P) para la trama, dando origen a un tejido llamado EP. (Salinero Gervaso, 2013)

Otro tejido del que se habla es del tejido sólido, su característica más importante es el recubrimiento en la parte integral de la banda, dándole mayor resistencia al fuego e impidiendo la penetración del agua. Además como no se separa de la carcasa le confiere una propiedad inherente de tejido sólido. Las fibras sintéticas de la urdimbre proporcionan la resistencia a la tracción y las fibras exteriores se encargan de amortiguar los impactos. Debido a su gran resistencia al desgaste de los bordes de la banda se impide la separación de sus fibras. (Salinero Gervaso, 2013)

La cubierta protege a la carcasa de la abrasión y cualquier otra condición local que contribuya al deterioro de la banda. En algunos casos estas condiciones pueden ser moderadas de tal forma que no se requiere protección ni cobertura para la banda. En otros

casos la abrasión y el corte pueden ser tan severos que se requiera una cubierta superior más gruesa de lo normal. En todo caso, el propósito de la selección de la cubierta es suministrar suficiente protección a la carcasa con el fin de que llegue al límite de su vida útil. (Salinero Gervaso, 2013)

2.1.3. NORMAS QUE RIGEN EL USO DE BANDAS TRANSPORTADORAS:

Actualmente el uso de las bandas transportadoras se rige por normativas internacionales que garantizan la seguridad de su uso en la minería subterránea, las normas más importantes a tener en cuenta son:

Norma ISO 340:2007 Conveyer belts- Laboratory scale flammability characteristics- Requirements and test method (bandas transportadoras - características de inflamabilidad a escala de laboratorio - Requisitos y método de ensayo). Ésta norma especifica un método para evaluar, en una escala pequeña, la reacción de una banda transportadora a una fuente de encendido de la llama. Es aplicable a bandas transportadoras que tienen una carcasa textil, así como cintas transportadoras de cable de acero.

Norma ISO 284:2004 Conveyer belts- Electrical conductivity- Specification and test method (bandas transportadoras- conductividad eléctrica- Especificación y método de ensayo). Ésta norma especifica la resistencia eléctrica máxima de una banda transportadora y el método de ensayo correspondiente. La prueba está diseñada para asegurar que la banda es suficientemente conductor para evitar la acumulación de carga estática que puede desarrollarse durante el uso del servicio.

Al tener que cumplir la normativa establecida se deben fijar unos parámetros de formulación en mezclas de caucho que es el material principal para la creación de las bandas y hacer los ensayos precisos, por tanto se debe conocer acerca del caucho y los agregados necesarios para obtener una banda transportadora que cumpla la normativa y tenga buenas propiedades mecánicas.

2.1.4. CAUCHO

El caucho es un producto que se obtiene de emulsiones lechosas de ciertas plantas o del árbol *Hevea Brasiliensis* (árbol de caucho). La emulsión lechosa es conocida como látex a la que se le realiza un tratamiento químico basado a manera general en un proceso de secado y de ahumado para conseguir el caucho. El caucho también puede ser obtenido de manera sintética, imitándose el proceso de producción, y obteniéndose así el denominado caucho sintético que técnicamente se conocen como elastómeros y que comercialmente tienen diversos nombres, estos cauchos sintéticos se utilizan como sustitutos del caucho natural debido a su excelente resistencia química a los ácidos, aceites minerales, gases y otras sustancias; son también más estables a temperaturas elevadas, que el caucho natural. Se obtienen por polimerización de diolefinas derivadas del petróleo, las cuales sufren un tratamiento previo de emulsionamiento y coagulación, por ejemplo el “neopreno”, es un caucho sintético obtenido por polimerización del cloropreno, este producto se utiliza industrialmente en revestimiento de cables eléctricos, mangueras, rodillos, telas impermeables, adhesivos y piezas moldeadas. (Castro, 2008)

En la industria se emplean generalmente los dos tipos de caucho: el natural y el sintético. Este último obtenido a través de varios polímeros, sirve como se había descrito anteriormente para la fabricación de productos como adhesivos, neumáticos, bandas transportadoras, productos moldeados, forros de alfombra de látex, entre otros. El caucho natural se produce en su mayoría en el sudeste asiático y el sintético procede en gran parte de países industrializados como Estados Unidos, Japón, Europa y tenemos a Brasil el único país en desarrollo que posee una industria importante de caucho sintético. (Fajen & Beliczky, 1993)

El mayor porcentaje de caucho natural y sintético es utilizado para la fabricación de neumáticos, mangueras, calzado de goma, colchones inflables, adhesivos, bandas transportadoras y demás. En el caso de las bandas que es el tema en el que se va a centrar este proyecto se deben tener en cuenta diferentes aspectos como la formulación de mezclas de caucho, el proceso de obtención de una banda transportadora que cumpla con los requisitos exigidos y el análisis de las propiedades mecánicas del producto final.

2.1.5. FORMULACIÓN DE MEZCLAS DE CAUCHO

Una formulación de caucho está compuesta básicamente por elementos como: polímeros, cargas, sistema de vulcanización, plastificantes, ayudas de proceso, agentes de protección y productos especiales. Elementos que deben ser combinados en la proporción adecuada de acuerdo a las características buscadas para el producto final de caucho. Durante el proceso de selección de los componentes a emplear en la mezcla se debe tener en cuenta la aplicación del producto a fabricar, conservando cuidado con la forma de procesamiento del caucho porque de esto depende la fluidez requerida para la formulación, del mismo modo se debe hacer la elección adecuada del caucho base a emplear y a las propiedades mecánicas finales solicitadas. (Saldarriaga Villa, 2011)

Caucho: Para la formulación de mezclas se entenderá como caucho a la sustancia orgánica (formadas por carbono, oxígeno e hidrógeno) a las que en algunos casos se les adicionan elementos como silicio, cloro y bromo, por ejemplo. Se puede decir que las moléculas de caucho son de tamaño gigante con respecto a otras moléculas porque los cauchos son polímeros, es decir cadenas moleculares cuyos eslabones (monómeros) se van repitiendo y constituyen la unidad de las mismas. (Maier, 2014)

Si se estira un caucho crudo, se observa que algo en él resiste al estiramiento, esto se debe a que las moléculas o cadenas se atraen entre sí, en algunos cauchos esa atracción es mayor y en otros es menor. Se tienen en cuenta entonces las fuerzas de atracción intermoleculares donde los cauchos con altas fuerzas de atracción se denominan cristalinos, porque al estirarse las moléculas tienden a posicionarse en la dirección del esfuerzo. Mientras que los cauchos con bajas fuerzas de atracción intermolecular se denominan amorfos porque al estirarlos quedan desordenados como antes, en ellos las moléculas no se oponen al estiramiento y algunas llegan a romperse bajo su acción. (Maier, 2014)

2.1.6. MODELO DE LAS FASES

En los cauchos existen dos tipos de comportamientos, el comportamiento elástico y el comportamiento plástico.

Comportamiento Elástico: Aquel en el que el caucho tiende a volver a su forma inicial, como si nada hubiera pasado. Este comportamiento queda explicado por la existencia de fuerzas de atracción que se oponen a la deformación.

Comportamiento Plástico: Depende de los resbalamientos entre moléculas: es aquel que de alguna manera explica por qué el caucho se plastifica o se deforma al mezclarlo, extrusionarlo o moldearlo.

Ambos comportamientos coexisten en un mismo caucho, se puede definir entonces la existencia de dos fases: Fase Elástica y Fase Plástica. La primera es responsable de la elasticidad del caucho (ya sea crudo o vulcanizado) y la segunda de su plasticidad (o de su capacidad de quedar deformado, en más o menos permanente). (Friedenthal, 1993)

Compuesto: Con los conocimientos generales del caucho se puede pasar a la definición de un compuesto, que es un conjunto de alrededor de 10 a 30 materias primas o ingredientes que se unen íntimamente al caucho en la operación de mezclado. Estos ingredientes cumplen unas funciones básicas.

Reforzar: negro de humo, cargas claras.

Proteger de la degradación: antioxidantes, ceras, antiozonantes.

Facilitar el procesado: resinas, peptizantes, aceites.

Vulcanizar: activantes, acelerantes, vulcanizantes.

Teóricamente un compuesto deberá estar formulado para satisfacer tres requisitos:

1. Costo mínimo compatible con la calidad. Materias primas fáciles de adquirir y que permiten estandarizar sus stocks.
2. Facilidad del procesado, mínimo defectivo y nivel de rechazos. Máxima productividad.
3. Calidad en su vida útil, en el artículo vulcanizado.

Este compuesto estará en estado crudo y luego de ser procesado (extrusionado, calandrado, moldeado) pasará al estado vulcanizado, si se le entrega una cantidad de calor definida. Durante este proceso el compuesto pierde fase plástica y gana fase elástica, pero no en forma total. (Friedenthal, 1993)

2.1.7. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES PARA LA MEZCLAS CON CAUCHO

La selección de los componentes para formar un compuesto con las características requeridas dependerán de:

1. La selección del caucho
2. La selección y cantidades de los componentes
3. La forma de realizar la mezcla
4. Los métodos de moldeo
5. La vulcanización

En general, una formulación está constituida por:

1. Una base elastómera
2. Agentes reforzantes
3. Ayudas de proceso
4. Anti degradantes
5. Sistemas de vulcanización

Cada uno de estos componentes se define a continuación.

BASE ELASTOMÉRICA: Es una base de materiales que recuperan su forma original casi por completo después de liberar una fuerza que se aplicó sobre ellos. Esta base puede estar compuesta por: caucho natural, sintético, mezcla de caucho natural y sintético, mezclas de cauchos sintéticos, caucho reciclado, entre otros. (González Cantú, 2003)

AGENTES REFORZANTES: Se utilizan para mejorar propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas, economizar y ayudar en el proceso. Estos pueden ser rellenos orgánicos e inorgánicos, fibrosos, sílicas, cargas negras y blancas, que pueden actuar como relleno reforzante, semireforzante y no reforzante. Para su selección se debe tener en cuenta el tamaño de partícula, el área superficial, la estructura y la actividad superficial. (González Cantú, 2003) El más empleado es el negro de humo que es el producto que le da el color negro y que transfiere al caucho una mayor resistencia mecánica y por lo tanto una mejor resistencia a la abrasión. (Baeza, 2015)

Los cauchos amorfos necesitan imperiosamente ser reforzados con cargas, y en mayor cantidad que los cauchos cristalinos, para tener propiedades aceptables. Ésta operación de reforzado se logra en el mezclado, la carga debe ser incorporada al polímero y luego

dispersada para lograr que se rompan las partículas de la misma y se contacten íntimamente con las moléculas del elastómero. (Friedenthal, 1993)

AYUDAS DEL PROCESO: Se utilizan para reducir el tiempo y la energía durante el mezclado, además mejora la dispersión de los componentes en polvo, proporcionando así elasticidad y mejor procesabilidad del caucho. Se manejan en concentraciones de 5 ppr, con un mínimo efecto en la vulcanización. Para la selección de las ayudas de proceso se consideran los siguientes factores: compatibilidad, costo, eficiencia, manchado, y las propiedades a bajas temperaturas. Estos pueden ser ablandadores, plastificantes, peptizantes, lubricantes, agentes de adhesión, suavizantes, ayudas de dispersión, aceites y resinas. (González Cantú, 2003)

Peptizantes: Empleados para la eficiencia en la masticación del caucho y evitar la formación de radicales libres, se añade al inicio del mezclado debido a que el azufre inhibe su acción, los cauchos sintéticos requieren altas concentraciones de peptizante. Los complejos de quelatos como fierro, cobalto y manganeso son muy eficientes para reducir la viscosidad y se disponen en concentraciones de 0,1-0,5 ppr. (González Cantú, 2003)

Semipeptizantes: Ayudan al rompimiento de las moléculas de caucho naturales y sintéticos, en algunos casos facilitan el mezclado y procesado. Estos se mezclan generalmente con componentes orgánicos sulfurados y aceites minerales con densidades de 0,82-1,23 g/cm³ (González Cantú, 2003).

Ablandadores: Se aplican en pequeñas cantidades para facilitar la incorporación de los rellenos, ablandar la pasta de caucho durante la vulcanización y así facilitar el procesamiento. Los principales ablandadores son obtenidos del petróleo (aceite nafténico, aromático, cera, asfalto), pino (alquitrán de pino, resina), alquitrán de hulla (aceite de alquitrán de hulla, resina), aceites y grasas naturales (aceites vegetales, ácidos grasos), compuestos orgánicos sintéticos (plastificantes del tipo éster, polímeros líquidos, entre componentes sintéticos). La selección del ablandador puede ser por:

- a. Estructura química (polaridad y aromaticidad) para determinar el grado de compatibilidad con el caucho.
- b. Pero molecular, controla la viscosidad del material.
- c. Reactividad química. La cual cubre el efecto catalítico en la oxidación. (González Cantú, 2003)

Plastificantes: Pueden reducir el punto de transición vítrea y el módulo de elasticidad, resultando la mejora de la flexibilidad en frío. El módulo estático y la resistencia a la tracción son disminuidos en la mayoría de los casos resultando una elongación a la rotura alta. Plastificantes especiales brindan retardo de la llama, propiedades antiestáticas, pegajosidad de las mezclas en crudo o permanencia. (Baeza, 2015)

Ácidos grasos y sales: se aplican en pequeñas cantidades como parte del sistema de vulcanización con azufre, el ácido esteárico también funciona como un plastificante, ayuda a la dispersión del negro de humo y otros rellenos, además disminuye la tendencia de adhesión a los rodillos. Bajo las mismas circunstancias el estearato de zinc se utiliza en lugar del ácido esteárico y óxido de zinc. Algunas veces son usados como ayudas de proceso el laureato de zinc y las sales de zinc de alto peso molecular. (González Cantú, 2003)

Aceites y extendedores: los aceites de petróleo actúan mejor de forma física que de forma química, su efecto no depende de la temperatura de mezclado y actúan como un plastificante durante el procesado causando una reducción en la viscosidad y facilitando la incorporación del relleno. (González Cantú, 2003)

Lubricantes: las materias primas esenciales para esta clase de productos son ácidos grasos, sales de ácidos grasos, ésteres de ácidos grasos, amidas de ácidos grasos, y alcoholes grasos. Pero también son importantes los hidrocarburos como la cera de la parafina.

Recientemente se han incluido el polietileno y el polipropileno de bajo peso molecular por su carácter ceroso. Debido al bajo punto de fusión y al carácter ceroso de los ácidos grasos, estos mejoran el mezclado y el procesamiento intermedio, reducen además la pegajosidad de los compuestos. Los lubricantes modernos contienen frecuentemente las sales de ácidos grasos insaturados debido a su mejor solubilidad en el caucho y sus puntos de fusión más bajos. (Baeza, 2015)

Facticio: durante el mezclado controlan el nervio del caucho, logran una mejor dispersión e incorporación de los componentes en forma de polvo, se usan como ayudas de proceso en la extrusión de los cauchos naturales y sintéticos ya que proporcionan un filamento de buena calidad y previenen la deformación durante la vulcanización. (González Cantú, 2003)

Asfalto: Ayuda de proceso que se usa como extendedor de baja densidad por su bajo costo, disminuye la temperatura de procesado y la tendencia a un sobrecurado. Se obtienen piezas de apariencia oscura brillante. No presenta problemas al incorporarse con el caucho. La diferencia entre los tipos de Asfaltos es su punto de fusión por ejemplo 120, 130 y 160°C, su presentación es en forma de terrones irregulares o polvos. (González Cantú, 2003)

Resina Coumarona: Usada como plastificante en cauchos sintéticos para adherirse a los rodillos. Su apariencia varía desde líquidos viscosos hasta sólidos, en el caso de los líquidos varían en el color desde café oscuro a crema y en los sólidos se caracterizan por el punto de fusión de 65 a 110°C. (González Cantú, 2003)

Resinas de estireno: se usan como ayudas de proceso para termoplásticos debido a su acción reforzante, particularmente en piezas que necesitan tener una alta dureza. Para asegurar una buena dispersión de la resina, la temperatura de mezclado debe ser mayor a 95°C. (González Cantú, 2003)

ANTIDEGRADANTES: La función de los antidegradantes es prevenir que las propiedades cambien durante su servicio debido a una degradación por oxidación o el ataque por ozono. Para la selección de los antidegradantes se consideran los siguientes criterios: costo, solubilidad, estabilidad al calor, a la luz, al oxígeno y a otros factores, además dependerá de la aplicación de la pieza. Estos se dividen en antioxidantes y antiozonantes.

Antioxidantes: Disminuye la degradación mediante oxidación.

Antiozonantes: Contribuye a retrasar o detener la degradación por el ozono. Forma una barrera impermeable o capa de ozono en la superficie de la piel de la goma. (Baeza, 2015; González Cantú, 2003)

SISTEMA DE VULCANIZACION: Proceso de entrecruzamiento de las moléculas de caucho por medio de puentes de vulcanización, generalmente formados por átomos de azufre. El proceso de creación de puentes de vulcanización se inicia desde el momento mismo en que mezclamos con el caucho el llamado sistema de vulcanización. (Friedenthal, 1993)

La vulcanización es un proceso de cura irreversible y debe ser fuertemente contrastado con los procesos termoplásticos que caracterizan el comportamiento de la vasta mayoría de los polímeros modernos. Este proceso irreversible define a los cauchos curados como materiales termorrígidos (no se funden con el calor) y los saca de la categoría de los termoplásticos (como el polietileno y el polipropileno). Un sistema de vulcanización está compuesto por los siguientes materiales:

- a. Activantes: óxido de zinc, ácido esteárico.
- b. Acelerantes: tiazoles (MBT, MBTS), sulfenamidas (CBS, TBBS, NOBS), tiuramos (TMTM, TMTD), guanidinas (DPG).
- c. Vulcanizantes: Azufre

El sistema de vulcanización a elegir depende del tipo de caucho, de las propiedades finales deseadas y también de las características del proceso. (Herrera Castañeda, 1839). Otra forma definición para el sistema de vulcanización es que se usa para retardar o acelerar el sistema de entrecruzamiento. Sin su uso la vulcanización del caucho sería muy lenta y tardaría días o meses en obtenerse un material vulcanizado con determinadas propiedades. Con la vulcanización se incrementa el esfuerzo tensil, el módulo, la dureza, la resistencia a la abrasión y por consiguiente disminuye la elongación, compresión permanente y la solubilidad. La resistencia a la tensión y al rasgado muestra un valor óptimo, debido a los cambios producidos por el grado de entrecruzamiento. (González Cantú, 2003)

Sistema de vulcanización con azufre: Es el agente de vulcanización más ampliamente usado en los cauchos, cuya estructura está conformada por dobles ligaduras como en el caso de los cauchos: natural, estireno-butadieno (SBR), polibutadieno, nitrilo, policloropreno y polisopreno. Es insoluble en el caucho por lo que migra a la superficie antes de la vulcanización, es de bajo costo y baja toxicidad, compatible con otros aditivos. (González Cantú, 2003)

Sistema de vulcanización sin azufre: Los cauchos que no contienen dobles ligaduras en su estructura molecular no pueden ser vulcanizados con azufre, requieren de un agente entrecruzante alterno capaz de reaccionar con una ligadura, para este tipo de cauchos se puede usar los peróxidos. Los agentes del tipo óxidos metálicos o compuestos difuncionales son usados en casos especiales. Al usar peróxidos, los compuestos presentan mejores propiedades en el envejecimiento térmico, baja compresión permanente y buena flexibilidad a bajas temperaturas. Se deben tomar medidas de precaución durante su manejo y almacenamiento ya que son sustancias de riesgo. (González Cantú, 2003)

2.1.8. PROPIEDADES MECANICAS DEL CAUCHO VULCANIZADO

Abrasión: La resistencia a la abrasión es más comúnmente conocida como la pérdida por abrasión, que puede definirse como la pérdida de masa de una pieza de caucho sometida a un agente abrasivo en condiciones específicas. (Castro Lopez & Castro Molano, 2005)

Los signos que manifiestan el desgaste para cauchos compuestos son la rugosidad superficial y la formación de partículas pequeñas conocidas como la ruptura de los enlaces moleculares primarios. El desgaste es debido a las fuerzas de fricción entre una aspereza y la superficie del caucho causando la rotura de enlaces moleculares. El desgaste continuo en una dirección resulta en la formación de crestas perpendiculares a la dirección del movimiento. Finalmente, se puede decir que la muestra alcanza un tamaño y espaciado en estado estacionario, y la tasa de desgaste es constante. (Stupak, Kang, & Donovan, 1991)

El abrasímetro por tanto ofrece una comparación entre materiales con similar peso específico. La abrasión en una muestra estándar se obtiene mediante la acción de una hoja de papel abrasivo calibrado que se aplica sobre un tambor rotante bajo un ciclo de ensayo estándar.

Dureza Shore: Mide la relación elástica del material cuando dejamos caer sobre él o intentamos penetrarlo con un material más duro. Mientras más blando sea el material, mayor cantidad de la energía que lanzamos o presionamos sobre él se absorbe en el choque. El resto de energía se traduce en un rebote, que es lo que medimos en este ensayo. Existen distintas escalas de medida adaptadas a distintos tipos de material. (Castro Lopez & Castro Molano, 2005)

Escala A: Gomas blandas, plásticos, elastómeros.

Escala B: Elastómeros, plásticos duros, papel y material fibroso.

Escala C: Revestimientos de yeso, elastómeros y plásticos de dureza media.

Escala D: Gomas duras y termoplásticos.

Escala DO: Materiales granulares gruesos y bobinas.

Escala O: Elastómeros muy blandos, bobinas textiles.

Escala OO: Espumas ligeras, esponjas.

Escala OOO: Geles y esponjas.

Visualización de la vulcanización: el reómetro es un aparato en dónde se moldea una pequeña muestra de mezcla dentro de una cámara donde se aloja un rotor estriado (de forma cónica) a temperatura fija. El rotor tiene un movimiento oscilatorio, de modo que ejerce un trabajo mecánico sobre la muestra. Por efecto de dicho trabajo y de la temperatura, la muestra se va vulcanizando a medida que el tiempo transcurre.

En el reómetro se mide el torque, resistencia que tiene el rotor para mover la goma, en función del tiempo. El torque es una medida del grado de vulcanización del compuesto, en cualquier momento. La grafica describe torque en función del tiempo, que brinda información completa sobre la velocidad de cura, niveles totales de vulcanización alcanzados, tendencia a la pre vulcanización, entre otros. (Friedenthal, 1993)

Resistencia a la fatiga (flex): La vida a fatiga se puede definir como el "fallo debido a cargas repetitivas; que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura". El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio. Se sabe que el 90% de las fallas de los componentes industriales, es debido a causas mecánicas, de aquí la importancia de éste ensayo. La mayoría de las fallas por fatiga, comienzan en la superficie y progresan inicialmente de una manera lenta; después de que la minúscula muesca o fisura ha crecido considerablemente por la tensión, rotación o flexión, la fractura ocurre de repente. (Lawrence., 2008).

Prueba de Adhesión (Peel test): un ensayo de pelado se lleva a cabo entre dos sustratos (en este caso la lona utilizada) unidos entre sí con un adhesivo. Los sustratos pueden ser tanto flexible o uno puede ser flexible, mientras que el otro es rígido. El adhesivo en sí generalmente toma la forma de una capa delgada entre los dos sustratos, tales como el adhesivo situado en la parte inferior de un trozo de cinta que se ha colocado contra una placa de acero.

El objetivo de un ensayo de pelado es determinar la fuerza de adherencia del material o la fuerza de la unión adhesiva entre dos materiales. Esta fuerza adhesiva puede ser denominada como la "pegajosidad" de un material, ya que es una medida de la resistencia de las muestras a la separación el uno del otro después de que se ha aplicado el adhesivo. Este valor medido puede utilizarse entonces para determinar si la unión adhesiva es lo

suficientemente fuerte o demasiado fuerte para la aplicación y si es necesario un proceso de adhesivo o de unión diferente. ("Peel Test," 2016)

Los tipos más comunes de las pruebas de pelado para la medición de la fuerza adhesiva son el desprendimiento en T, 90 grados de la corteza y el despegado a 180 grados. La prueba de desprendimiento en T es un tipo de prueba de tracción realizada sobre dos sustratos flexibles que han sido unidas entre sí y se colocaron de tal manera que un sustrato se pega para arriba y el otro hacia abajo mientras que la zona de unión sobresale horizontalmente de modo que la configuración completa forma una T. ("Peel Test," 2016)

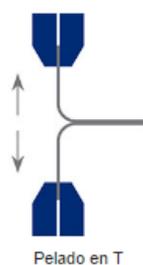


Figura 1. Pelado en T. Fuente:("Peel and Adhesion Testing KC | Knowledge Centre Test Types | Knowledge Centre," 2016)

La prueba T requiere un dispositivo de prueba de pelado de 90 grados para determinar la fuerza de adherencia entre un sustrato flexible (cinta) y un sustrato rígido (placa), donde la placa se encuentra en posición horizontal con el extremo agarrado de la cinta que sobresale perpendicular mientras que el resto está unido a la placa de manera que forma una "L". La prueba de 180 grados es similar a la prueba de pelado de 90 grados, excepto que la zona de unión entre la cinta y la placa se coloca verticalmente entre las mordazas de prueba de pelado, mientras que el extremo libre de la placa es agarrado por la parte inferior y el extremo libre de la cinta es agarrado por la parte superior de manera que forme un apretado en forma de "U". ("Peel Test," 2016)

Tensión: la extensión final de una muestra que ha sido sometida a un esfuerzo y expresado como porcentaje de su longitud original.

Los elastómeros que son polímeros amorfos no se cristalizan fácilmente durante su obtención, tienen una baja temperatura de transición vítrea y las cadenas se pueden deformar elásticamente, por lo que los elastómeros presentan un comportamiento elástico

no lineal. Inicialmente, se reduce el módulo de elasticidad por el desenroscado de las cadenas. Sin embargo, una vez extendidas las cadenas las cadenas, ocurre deformación elástica adicional al estirarse los enlaces, con módulo de elasticidad más elevado. (Castro Lopez & Castro Molano, 2005)

2.2. ESTADO DEL ARTE

2.2.1. ANTECEDENTE DE INVESTIGACIÓN

El actual mercado globalizado ha generado nuevos retos a las industrias, permitiéndoles ser pioneras en el desarrollo e Investigación de nuevos productos. En este sentido recalcamos la importancia de la industria de las bandas transportadora, porque ha permitido la innovación y la optimización de los procesos productivos en los diferentes sectores económicos. A continuación se relaciona los temas de investigación a nivel nacional e internacional en el campo de la formulación de mezclas de agregados del caucho. Los estudios son los siguientes:

1. El caucho en Colombia
2. Investigaciones relacionadas en los efectos de agregados en mezclas de caucho y sus propiedades mecánicas

2.2.2. EL CAUCHO EN COLOMBIA

En Colombia la explotación de caucho se remonta a mediados del siglo XIX, hoy en día se cree que hay cerca de 52.2221,7 hectáreas del árbol de caucho natural y, según un informe publicado por Confederación Cauchera Colombiana CCC (2014), el consumo anual es de aproximadamente 17.000 Tm anuales, lo que no soporta la gran demanda interna que existe en el país. A pesar de que Colombia cuenta con los recursos naturales y de demanda para ser más productivo todavía no lo es, esto puede ser debido a la falta de tecnología, calidad de los clones de siembra, falta de apoyo al campesino y falta de conocimiento sobre los estándares de calidad y productividad exigidos (Mayorga Sánchez & Herrera Riveros, 2016)

2.2.3. INVESTIGACIONES RELACIONADAS EN LOS EFECTOS DE AGREGADOS EN MEZCLAS DE CAUCHO Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS

1. Determinación del efecto de retardantes del fuego del boro de fosfato en resinas. Mihaela Petric, Mata Grozav, Gheorghe Ilia. Institutul de Chimie Timisoara, Mihai Viteazul Blv. 24, Timisoara-300223, Romania

Los retardantes de llama son materiales que inhiben o se resisten a la propagación del fuego. La adición de este tipo de materiales de maderas, textiles, polímeros, etc. decrece su inflamabilidad. La eficacia de los retardantes de llama se mide por el cambio en la concentración crítica de oxígeno. Se estudió el efecto retardante de llama de fosfato de boro y cómo cambia la carta de intención de algunas resinas. Si la concentración de BPO4 en la mezcla con resinas fotómetro aumenta hasta el 50%, LOI de resinas aumenta 15-18 a 32-38%.

El tamaño relativamente pequeño de las muestras requeridas para la prueba hace que el índice de oxígeno a prueba una prueba útil en el control de investigación y desarrollo o la calidad de los productos tratados retardantes del fuego.

Las principales ventajas de la utilización de BPO4 como retardante de llama son su baja toxicidad, su estado sólido (que se añade durante el proceso de la producción de un polímero, por ejemplo), así como su bajo evolución de humo. BPO4 podría ser también muy atractivo debido a su bajo coste. (Petric, Grozav, & Ilia, 2010)

2. Formulación y caracterización de materiales compuestos integrados por una matriz de caucho estireno-butadieno (SBR) reforzada con nanoarcilla. Rosa María Bellas García. Universidad de Coruña.

En estas tesis se pudo determinar el comportamiento del caucho de estireno-butadieno (SBR) cuando se incorporan a su matriz polimérica un bajo contenido de nanocarga y antioxidantes. Los resultados obtenidos en el trabajo indican que la incorporación de nanoarcilla proporciona una importante mejora en las propiedades mecánicas, dinamomecánicas y térmicas. Las propiedades finales de los nanocompuestos de SBR estarán directamente relacionadas con el grado de dispersión y el tamaño final de los agregados. Además, el efecto del antioxidante es mejorar considerablemente la resistencia al envejecimiento de los compuestos. (Bellas García, 2012)

3. Relación entre el calor de vulcanización y la densidad de entrecruzamiento de mezclas reforzadas de caucho natural colombiano y caucho estireno butadieno (NR-SBR) William Urrego, Mónica Álvarez. Grupo de Investigación en Materiales de ingeniería, Universidad EAFIT. Medellín, Colombia

Resumen: la formulación de mezclas de elastómeros al igual que el comportamiento reológico durante el mezclado y la estandarización del proceso de vulcanización son factores críticos, que se deben conocerse antes de cualquier caracterización fisicoquímica. La evaluación del grado de entrecruzamiento mediante hinchamiento de solventes, de identifico que la mayor cantidad de puentes de azufre en el proceso de vulcanización se presentó con el compuesto de 100% caucho estireno butadieno (SBR), a medida que se adicione mezclas de caucho natural (NR) se notó una disminución en la medida de la densidad entrecruzamiento. Se pudo determinar que el calor generado en la reacción de vulcanización depende de la formación de puentes o puntos de entrecruzamiento en la red elastómera, son directamente proporcionales. (Urrego & Álvarez, 2013)

4. Optimización de cintas transportadoras de caucho, resistentes al fuego utilizando un modelo matemático de las funciones de deseabilidad. Afrim Dushi, Florian Kongoli, Ian Mcbow, Musa Rizaj. University of Prishtina, Faculty of Mining and Metallurgy, Kosovo FLOGEN Technologies Inc., Canada/USA.

En este artículo se centraron en la formulación de las bandas transportadora con el fin de minimizar los accidentes causados por los incendios en la minas de extracción de minera. Se trabajó con los siguientes agregados Sb_2O_3 , parafinas cloradas y arcillas los experimentos fueron diseñados con el diseño compuesto central giratorio (CCRD) de segundo orden, de acuerdo con el modelo matemático de las funciones de deseabilidad. (Dushi, Kongoli, Mcbow, & Rizaj, 2013)

5. Propiedades mecánicas bajo compresión y resistencia al desgaste abrasivo de piezas gruesas de caucho acrilonitrilo. Sandra Milena Velásquez Restrepo, Diego Hernán Giraldo-Vásquez, Natalia Trinidad Zapata-Gallego. Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.), Septiembre-Diciembre 2015, Vol. 24. No. 40. pp. 69-82

Es común el uso de caucho nitrilos NBR en situaciones en las que se exponen al medio ambiente, en donde la temperatura, la radiación UV y el ozono alteran las propiedades del material por diversos mecanismos de degradación; pero no existe aún un consenso sobre el efecto de algunas condiciones de envejecimiento en propiedades tan relevantes como al desgaste abrasivo. Utilizados en diversos tipos de industrias, es pertinente generar información sobre propiedades mecánicas y desgaste, aplicando metodologías que permitan evaluar el desempeño en condiciones lo más cercanas posibles a las de servicio. (Baeza, 2015)

6. Vulcanización del caucho para bandas transportadoras con inserción metálica mediante ultrasonido. Dan Dobrotă. Engineering Faculty, University "Constantin Brâncuși" of Târgu-Jiu, 201141, România

Para aumentar la vida de las cintas transportadoras, se requiere un proceso de vulcanización de ellos, de modo que, en el área de la articulación, las características físicas y mecánicas deben ser los mismos o muy cerca del resto de la cinta transportadora. La aplicación de ultrasonido mostró un conjunto de bandas transportadoras vulcanizado con inserciones

metálicas incrustadas tienen características superiores en comparación con los obtenidos cuando no se utiliza ultrasonido. (Dobrota, 2015)

3. METODOLOGIA

3.1 Localización

Se desarrolló en la empresa Icobandas S.A, ubicada en la ciudad de Popayán, ésta es una ciudad de Colombia capital del departamento del Cauca, se encuentra localizada en el Valle de Pubenza, entre la cordillera occidental y central al sur occidente del país. Su extensión territorial es de 512 km²; su altitud media es de 1.760 metros sobre el nivel del mar; su precipitación media es de 1.941 mm; su temperatura promedio es de 18/20 °C, dista aproximadamente de Bogotá, capital de Colombia, a 600 Km; de Cali, tercera ciudad más importante del país, a 130 Km; de Buenaventura, principal puerto de Colombia sobre el pacífico, a 249 Km; Pasto a 279 Km; de Pereira a 369 Km y de Medellín, segunda ciudad más importante del país, a 591 Km.

3.2 Equipos

Mechero bunsen de control de calidad Icobandas S.A

Abrasímetro ABRASION TESTER de Gibitre INSTRUMENTS de control de calidad Icobandas S.A

Durómetro PTC 306L según especificaciones ASTM 2240-75, utiliza una escala tipo A de 0 – 100 de control de calidad Icobandas S.A

Reómetro Monsanto 100S de control de calidad Icobandas S.A

Flex cracking tester Auto Testing Machine de control de calidad Icobandas S.A

Balanza analítica OHAUS de control de calidad Icobandas S.A

Molino de rodillos FARREL FOUNDRY de Icobandas S.A

Cortadora de caucho de Icobandas S.A

Prensa de vulcanización RET de control de calidad Icobandas S.A

Dinanómetro de control de calidad Icobandas S.A

3.3 Materiales y reactivos

Caucho butadieno (Serna Macia S.A)

Caucho SBR 1502 (Serna Macia S.A)

Caucho neopreno (Industria de la goma)

Caucho natural (Quiminsa Ltda)

Caucho nitrilo (Lanxess Energizing Chemistry)

Azufre (Corquiven, C.A)

Ácido esteárico (Proquimsa S.A)

Óxido de zinc (Transmerquim de Colombia S.A)

Antioxidante TMQ (Amster)

Antioxidante y antiozonante 6PPD (Flexsys)

Sílice (Glassven C.A)

Negro de humo (G & C Colors S.A)

Parafina clorada (Charlotte chemical internacional, S.A de C.V)

Trihidrato de alúmina (Huber engineered materials)

Borato de zinc (Marshall Company)

Acelerante de vulcanización TBBS (Brenntag)

Acelerante de vulcanización TMTD (Bayer materialscience)

Aceite antillama (Lanxess Energizing Chemistry)

Aceite nafténico (Nufarm Colombia S.A)

Lona de nylon (Textiles omnes S.A)

Lona poliéster (Textiles omnes S.A)

3.4 Métodos

A Continuación se describirán las fases metodológicas que se emplearon en el desarrollo de este trabajo. Se consideró como guía la formulación de unas mezclas patrón reportadas en la literatura, se realizó un diseño de experimentos con el que se pretendió cuantificar las cantidades de los compuestos de cada ensayo y medir las propiedades mecánicas de las mezclas.

DQS is member of:



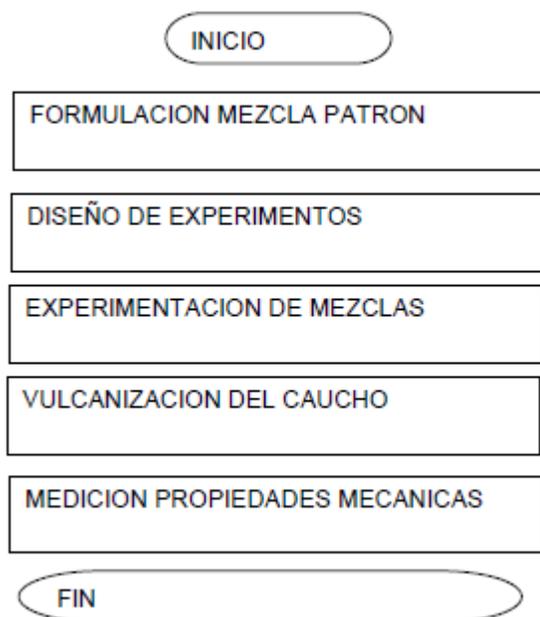


Figura 2. Diagrama de flujo para las fases metodológicas. Fuente: Autor

3.4.1. FORMULACION DE LA MEZCLA PATRON

Para esta primera parte se tomó como guía formulaciones reportadas en la literatura y se probaron nuevos ingredientes que aportaron características ignífugas para la obtención de mejores propiedades mecánicas.

Las siguientes formulaciones fueron las que se tuvieron en cuenta para hacer una nueva formulación de mezcla de caucho auto extingible empleando como base los compuestos utilizados en la literatura y la disponibilidad de las materias primas en la empresa Icobandas S.A para la elaboración de ésta. Por lo tanto solo se tomaron como guía en la elaboración de este trabajo.

Formulación 1: Basada en caucho natural (NR), caucho butadieno, estireno butadieno (SBR) y aluminio trihidrato (ATH) como retardante. (Baeza, 2015)

Formulación 2: Basada en etileno-vinil acetato (EVA), caucho de nitrilo-butadieno-hidrogenado (HNBR), como retardante el aluminio trihidrato (ATH) y biorato de zinc (ZB), retardante fosforo o nitrógeno. (Baeza, 2015)

La formulación que se realizó consistió de los siguientes compuestos:

Base Elastómera: Como base elastómera se decidió emplear SBR 1502, caucho butadieno, neopreno y en algunos ensayos caucho nitrilo 34%.

SBR: El caucho sintético Estireno Butadieno más conocido como caucho SBR es un copolímero formado por la polimerización de una mezcla de dos monómeros: el estireno y 1,3-Butadieno. Este tipo de caucho es el más empleado actualmente a nivel mundial. El SBR es un polímero producido por el proceso frio de la emulsión y proporcionan excelente resistencia a la abrasión, al calor y en el proceso de la vulcanización es muy estable, por tanto sus características son buenas para la realización de una mezcla de caucho auto extingible. (Fernandez Gracia, 1991)

Butadieno: caucho sintético obtenido mediante polimerización de 1,3-Butadieno. Tiene una flexibilidad muy alta, de hecho, el polibutadieno es el único caucho sintético con una flexibilidad mayor, la resistencia a la abrasión es alta y la flexibilidad a baja temperatura es excelente. Por otra parte sus limitaciones son baja adhesión para consigo mismo y baja tensión y resistencia al desgarre. (Friedenthal, 1993)

Neopreno: Se caracteriza por una buena resistencia a la flexión, excelente resistencia a la fatiga y una amplia resistencia a la interperie y el ozono. Es un caucho con excelente resistencia a los fluidos hidráulicos, aceites lubricantes, fluidos de transmisión, resistencia al fuego, entre otros. ("Neopreno," n.d.)

Caucho nitrilo 34%: usado en la literatura para la realización de mangueras para motor de carros que deben ser resistentes al fuego, por tanto se decidió comprobar su utilidad en esta formulación, como ya se había dicho antes el caucho SBR suministra excelente resistencia a la abrasión, al calor y en el proceso de la vulcanización es muy estable y por otro lado el caucho nitrilo es empleado como caucho resistente a los aceites y aporta una buena propiedad de adhesión.

Caucho natural: está clasificado dentro del grupo de materiales poliméricos conocido como elastómeros, posee excelentes propiedades que permiten su uso en aplicaciones de alta ingeniería como por ejemplo neumáticos, resortes, aplicaciones en la industria naval y aeronáutica. (Yepes, n.d.)

Para la realización de las formulaciones se empleó la unidad **PHR** que por sus siglas en inglés significa parts of ingredient per hundred of rubber, partes de aditivo por cada 100 partes de caucho.

Agentes reforzantes: Muchas de las condiciones de servicio del caucho demandan incrementos en la dureza, la resistencia al desgarro y a la abrasión. Para obtener estas propiedades se emplean los agentes reforzantes. Se emplearon como agentes reforzantes *sílice* y *negro de humo* los cuales generan tipos de interacciones que mejoran la resistencia a la abrasión.

Sistema de Vulcanización

Azufre: Empleado como agente de vulcanización, es el agente más comúnmente empleado. Es insoluble en el caucho por lo que migra a la superficie antes de la vulcanización, es de bajo costo y baja toxicidad, compatible con otros aditivos. Al calentarse caucho crudo con azufre la mezcla de caucho será más dura y resistente a cambios de temperatura.

Acelerantes: Se emplean para reducir el tiempo de vulcanización además de mejorar las propiedades físicas de la mezcla. Se utilizó un sistema de vulcanización típico formado por azufre, óxido metálico (en este caso óxido de zinc) y un ácido graso como el ácido esteárico

los cuales dependiendo de las concentraciones empleadas aumentan considerablemente la velocidad de vulcanización. Otros acelerantes secundarios a emplear serán: el N-terc-butyl-2 – benzotiazol sulfenamida (nombre comercial TBBS), es empleado generalmente en pequeñas cantidades y el Disulfuro de tetrametiluram (nombre comercial TMTD) ayuda a una buena vulcanización y ofrece buena resistencia al envejecimiento por calor y a la deformación por compresión cuando se usa en vulcanizaciones sin azufre y en sistemas eficientes de vulcanización (EV).

Antidegradantes:

Antioxidante: Previenen que las propiedades cambien durante su servicio debido a una degradación por oxidación. La mayoría de cauchos están sujetos a la oxidación y más cuando existen factores que aceleran la oxidación como el calor, la luz ultravioleta, la humedad, entre otros. En la formulación se empleará el antioxidante 2,2,4-trimetil-1,2 dihidroquinolina Polimerizado (nombre comercial TMQ) el cual actúa como un eliminador de radicales protegiendo del envejecimiento por oxidación y tiene un amplio rango de temperaturas de exposición.

Antiozonante: Previenen que las propiedades cambien durante su servicio debido a una degradación por ataque de ozono. Para evitar esto es necesario formar una barrera en la superficie de la pieza. El ozono se encuentra presente en la atmósfera formándose por la acción de la luz solar con las partículas de contaminación presentes en el medio ambiente. Se decidió emplear en la formulación a realizar el compuesto químico N-(1,3-dimetilbutil)-N'-fenil-p-fenilendiamina (nombre comercial 6PPD), es un antioxidante y antiozonante muy poderoso para compuestos de caucho natural y sintético, provee protección contra la fatiga en condiciones de operación estáticas y dinámicas.

Retardante de llama: Material o aditivo que disuaden o extinguen la propagación de la llama en condiciones de prueba estándar. Los retardantes de llama son indispensables en las mezclas de caucho a realizar debido a que son éstos los que van a dar a la mezcla su

propiedad ignífuga. Los retardantes de llama a emplear serán: trihidrato de alumina y borato de zinc.

Trihidrato de alumina (ATH): Retardante de llama más empleado actualmente. El ATH empieza a liberar agua de constitución por encima de 180 °C, la eliminación de agua facilita el enfriamiento de la superficie y dificulta la entrada de oxígeno, lo que le confiere propiedades como retardantes de llama y supresor de humos, por tanto es un material indispensable en productos de caucho con propiedades frente al fuego en lo que corresponde a materiales ignífugos.

Borato de Zinc: Retardante de llama y supresor de humo. Es altamente eficaz y ofrece beneficios como reducción de la producción de humos, evita que enardezca el material y ofrece baja toxicidad.

Plastificantes: Pueden ser incorporados durante el mezclado en los cauchos como el SBR y policloropreno, en los cuales se logra un ablandamiento durante la vulcanización. El plastificante a emplear será la parafina clorada el cual es muy empleado como plastificante en mezclas ignífugas.

Esos fueron los compuestos que se utilizaron para la formulación de caucho auto extingible, guiándonos en las cantidades reportadas en la literatura.

Retardante de llama: Los retardantes de llama disponibles en la empresa son los siguientes: trihidrato de alúmina y borato de zinc. Posteriormente se describen las cantidades reportadas por la literatura del uso de estos.

Trihidrato de alumina (ATH): Se usa en composiciones de 30 a 150 phr reportado por la literatura (Kenneth & Maguire, 2008). Otros autores describen composiciones de entre 75 a

195 phr (Goossens, 2006). Pero no se utilizaron cantidades tan altas como 195 phr debido a que ocasiona resultados no favorables en las propiedades mecánicas como la abrasión.

Borato de Zinc: Se emplea en cantidades de 2 a 25 phr (Weil & Levchik, 2016)

Todos los retardantes de llama se pueden emplear en composiciones elevadas pero se corría el riesgo de no tener un caucho con buena resistencia a la abrasión.

Aceites: los aceites actúan como un plastificante durante el procesado causando una reducción en la viscosidad y facilitando la incorporación del relleno. (González Cantú, 2003)

3.4.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Teniendo en cuenta las ideas del Dr. Genechi Taguchi acerca del diseño experimental ortogonal, se ha planteado el diseño ortogonal que consta de cuatro factores con dos niveles cada uno.

Se tendrán como factores los dos componentes retardantes de llama seleccionados (*trihidrato de alúmina y borato de Zinc*) además del negro de humo y el aceite nafténico cuyas composiciones se probarán en dos niveles de concentración dentro de los intervalos ya descritos.

En la Tabla 1.se presentan el diseño de experimentos propuesto.

Tabla 1.Diseño de Experimentos. Fuente: Autor

Factores controlables L8						
Negro de humo	ATH	Interacción A y B	Borato Zn	Interacción A y D	Interacción A y G	Aceite
A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	2	2	2	2
1	2	2	1	1	2	2
1	2	2	2	2	1	1
2	1	2	1	2	1	2
2	1	2	2	1	2	1
2	2	1	1	2	2	1
2	2	1	2	1	1	2

En la tabla 1 se plantean 8 experimentos cuyo análisis permitirá determinar el efecto de la concentración de cada uno de los retardantes de llama (trihidrato de alúmina y borato de zinc), negro de humo y aceite nafténico además se evaluará el efecto combinado de la mezcla de los compuestos.

3.5. EXPERIMENTACIÓN DE MEZCLAS

En esta etapa se estudió la composición de los compuestos retardantes de llama, manteniendo la base elastómera constante. Se realizaron las mezclas previamente definidas en el diseño de experimentos.

3.6. VULCANIZACION DEL CAUCHO

Una vez obtenida la fórmula se procedió a colocarla en práctica para verificar si se consiguió la mezcla de caucho deseada y que cumpla con las propiedades mecánicas requeridas. Los siguientes pasos serán los tenidos en cuenta para la elaboración de este trabajo de grado:

Una vez realizada la formula se procede a aplicar la siguiente ecuación

Ecuación 1:

$$\frac{\text{Cantidad de mezcla deseada en gramos}}{\text{PHR total de la formula}}$$

Supongamos el valor dado fue de 20, 8934, este valor dado se redondea a un número terminado en ceros para facilitar el pesado de los compuestos, en este caso se aproximará a 20 para proceder a realizar el siguiente cálculo.

Ecuación 2:

$$\text{Cantidad de gr a pesar} = 20 * \text{PHR del compuesto a pesar}$$

Dándonos el valor que se debe pesar de cada compuesto y así proceder primeramente al corte y pesado del caucho; posteriormente se pasó al pesado de los demás compuestos y finalmente se realizó una mezcla manual de éstos compuestos antes de llevarlos al molino.

Después de pesado los compuestos se empiezan a trabajar como tal en el molino de rodillos. Al pasar un tiempo se obtiene una banda sobre uno de los rodillos horizontales del molino conformado solamente de la base de caucho. (Ver Figura 3)



Figura 3. Mezclado de la base elastómera en el molino. Fuente: Icobandas S.A

Después de obtenerse esa base de caucho se le incorporaron los componentes químicos elegidos para la mezcla en una zona de alta mezcla que se ubica en el centro de los rodillos,

se homogenizó la banda de manera manual, recogiendo de la parte inferior del molino los ingredientes que éste no alcanzó a mezclar y se volvieron a agregar al centro de los rodillos, así se hizo hasta que no quedó ningún componente en el piso del molino, después se procedió a realizar cortes parciales sucesivos entre la banda, solaparlos y llevarlos al centro de los rodillos para mejorar la mezcla en dirección radial. (Ver Figura 4)



Figura 4. Incorporación de los compuestos a la base elastómera. Fuente: Icobandas S.A

Finalmente se obtuvo una banda que se dejó enfriar para después seguir con el proceso de moldeo y vulcanización.

Moldeo y vulcanización: una vez mezclados todos los ingredientes con la matriz de caucho se procedió al moldeo y vulcanización.

Se retiró la banda de caucho del molino de rodillos y se extendió sobre una superficie metálica, hasta que se enfrió; después se llevó al laboratorio donde se cortó a la banda laminada y fría, la cantidad de mezcla necesaria para cargar los moldes que serán llevados a

la prensa de vulcanización. El moldeado siempre se realiza dependiendo del tipo de propiedad física a medir: abrasión (Ver Figura 5), flex (Ver Figura 6), entre otros.



Figura 5. Molde de abrasión. Fuente: Icobandas S.A



Figura 6. Molde flex. Fuente: Icobandas S.A



Figura 7. Prensa de vulcanización. Fuente: Icobandas S.A

En la figura 7 se tiene la prensa de vulcanización que se empleó en este trabajo de grado a una temperatura de 150 °C. En la prensa se tiene estipulado un tiempo de 15 minutos y una presión de 70 Bar para el molde de abrasión y una presión de 100 Bar para el molde de flexión y así realizar los ensayos de vulcanización, estas condiciones ya están definidas en la empresa y no son modificadas a menos que sea necesario. Por tanto se pasó a introducir el molde a emplear para la vulcanización. Pasados los 15 minutos se retiró el molde (ya sea de abrasión o flexión) de la prensa, y se pasó a realizar un choque térmico en agua a temperatura ambiente con el propósito de detener la reacción de vulcanización. (Castro Lopez & Castro Molano, 2005).

MEDICION PROPIEDADES MECANICAS Y RESISTENCIA AL FUEGO

Resistencia al fuego: Se realizó de acuerdo a la norma ISO 340 con ayuda de un mechero de bunsen. Se expone una muestra del caucho vulcanizado a la llama de un mechero bunsen,

después de un tiempo de un minuto se retira el quemador y se registrará la duración de la llama.

Abrasividad: Para la medición de esta prueba se empleara el abrasímetro ABRASION TESTER de Gibitre INSTRUMENTS.



Figura 8. Abrasímetro ABRASION TESTER. Fuente: Icobandas S.A

Primero se pesan 3 muestras del mismo caucho, y se llevan al abrasímetro, éste equipo con el que cuenta la empresa lleva a cabo cada prueba en 2 minutos con un recorrido de aproximadamente 40 m. los cálculos se realizan teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

Ecuación 1:

$$\text{Indice de abrasión} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final (mg)}}{\text{densidad} \left(\frac{\text{mg}}{\text{mm}^3}\right)} * \frac{200 \text{ (mg)}}{\text{Abrasión controlada (mg)}}$$

Donde:

200 mg: cantidad de desgaste ideal referida a la pérdida en peso por cada 40 m de desplazamiento de una muestra estándar de referencia siguiendo la formulación de la norma ISO 4649. La relación entre este valor y la calidad de la lija abrasiva medida

efectivamente, debe ser ≈ 1 o >1 o <1 como valor del denominador y se obtiene un factor multiplicador.

Abrasión controlada: es el grado de abrasión dado por la lija utilizada en la prueba y de acuerdo con la norma ISO 4649, debe estar entre 180 mg y 220 mg de pérdida en peso de la muestra estándar por cada 40 m de desplazamiento. El valor definido para los ensayos se tomó como un valor fijo de 183 mg.

La fórmula a emplear es un fórmula estándar para el equipo de la empresa por tanto no se puede utilizar en todos los equipos de abrasión si no específicamente en el empleado durante este trabajo de grado.

Dureza: En este test se mide la penetración de un punzón a través del material. Es importante la duración de la carga sobre el material, ya que el caucho fluiría por la acción del durómetro, aumentado la dureza.

Se va a utilizar un durómetro PTC 306L según especificaciones ASTM 2240-75, utiliza una escala tipo A de 0 – 100 se extiende hasta 240.



Figura 9. Durómetro PTC 306 L. Fuente: Icobandas S.A

Reometría: Para la determinación del tiempo óptimo de vulcanización se utilizó un reómetro Monsanto 100S este equipo permite determinar las características de curado y vulcanizado. A una muestra sellada se le controla la temperatura, este equipo rota a una frecuencia de 1,67 Hz (100 cpm). Los datos de salida se correlacionan con el grado de vulcanización como una función del tiempo de curado.



Figura 10. Reómetro Monsanto 100 S. Fuente: Icobandas S.A

Resistencia a la fatiga (flex): En este trabajo de grado es necesario ver la resistencia a la fatiga del caucho, pues se sabe que van a trabajar con poleas y el caucho no se debe deteriorar tan rápido, aquí por tanto se verificó con tres muestras de caucho donde dos van en buen estado y la última tiene un pequeña grieta en la mitad para hacer notificar en cuanto tiempo se daña aquel caucho que ya tiene una fisura y aquellos que no tienen ninguna falla. De esta manera se sabrá cuanto tiempo dura el caucho trabajando hasta que se dañe completamente.



Figura 11. Flex cracking tester. Fuente: Icobandas S.A

Prueba de Adhesión: Esta prueba se basa en el peel adhesión test y se empieza de la siguiente forma: se determinan las lonas a utilizar y se realiza un corte de 13 cm de ancho por 28 cm de largo, después se le adiciona el caucho laminado previamente en la calandra con un grosor de 1 mm, se vulcaniza en la prensa por 15 minutos a una presión de 80 Bar y se deja enfriar por 15 minutos en la cabina extractora.

Después se corta una muestra a una medida de 4 cm, que es la enviada a la máquina de adhesiones (Ver figura 10), donde se ajusta la muestra y con ayuda de la bomba hidráulica se le da presión a velocidad constante para medir la adhesión caucho-caucho, se tiene que la presión máxima es la que se da cuando el caucho se empieza a despegar, y es ese valor es el anotado para utilizar en la ecuación 2.

Ecuación 2:

$$\text{Adhesión} = \frac{(X - 50) \frac{Lb}{\text{Pulg}^2} * (A) \text{Pulg}^2}{\text{Ancho muestra cm}} * \frac{2,54 \text{ cm}}{\text{pulg}}$$

Donde

X: Es la presión máxima medida

A: Área del pistón= 2,236



Figura 12. Máquina de adhesiones. Fuente: Icobandas S.A

Para la adhesión caucho-lona se hace un pequeño corte sin cortar la lona y se vuelve a evaluar al igual que la adhesión caucho-caucho, notificando la máxima presión alcanzada y se evalúan los resultados según la ecuación 2.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

ENSAYOS DE TERMOGRAVIMETRIA Y ESPECTROSCOPIA INFRAROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER DE UNA MUESTRA DE BANDA COMERCIAL

El análisis de la muestra comercial conjuntamente, por TGA e FTIR, junto con un estudio bibliográfico permite determinar la composición o formulación de las bandas comerciales que presentan buenas propiedades antillama.

ENSAYO TGA

En la Figura 13 se muestran los resultados del ensayo TGA, la curva verde representa la pérdida de peso de la muestra en función de la temperatura y la curva azul es la derivada de pérdida de peso en función del tiempo.

DQS is member of:



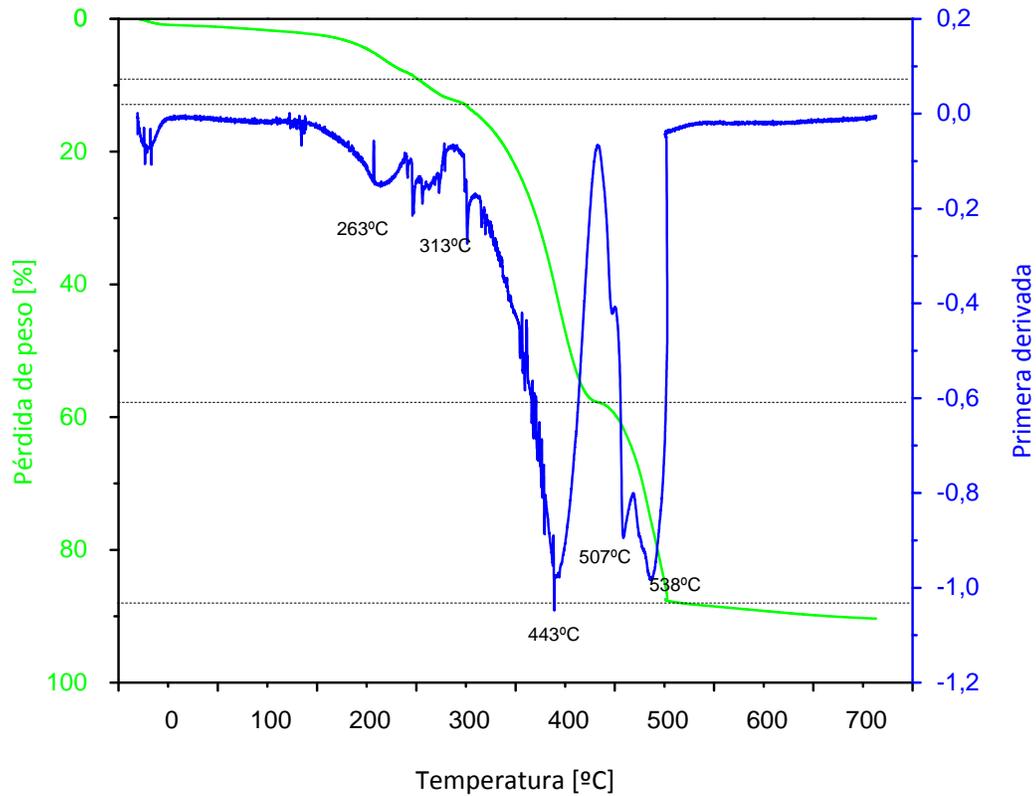


Figura 13. TGA de una muestra Comercial de una banda transportadora. Fuente: Universidad de Pamplona

Las pérdidas de peso en diferentes intervalos de temperatura, se asocian con una serie de compuestos, de la forma como se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos del análisis TGA. Fuente: Universidad de Pamplona

Componente	% Peso	Temperatura [°C]	Referencia
Aditivos/Volátiles	8,3	261	(Baeza, 2015)
Compuestos Clorados	3.9	308	(Baeza, 2015)
Elastómero	45,8	449	(Menis & Rook, 1980)
Negro de Carbono	30,0	509-538	(Baeza, 2015; Menis & Rook, 1980)
Residuos	12,0	>540	(Baeza, 2015; Menis & Rook, 1980)

Los cauchos estireno-butadieno se caracterizan por presentar picos pequeños y angostos a 261°C y 449°C, estos picos se corresponden con la pérdida de material volátil de la muestra de caucho y posteriormente con la máxima velocidad de degradación del mismo; bajo condiciones de calentamiento de 10°C/min en un flujo de N₂.

ENSAYO DSC

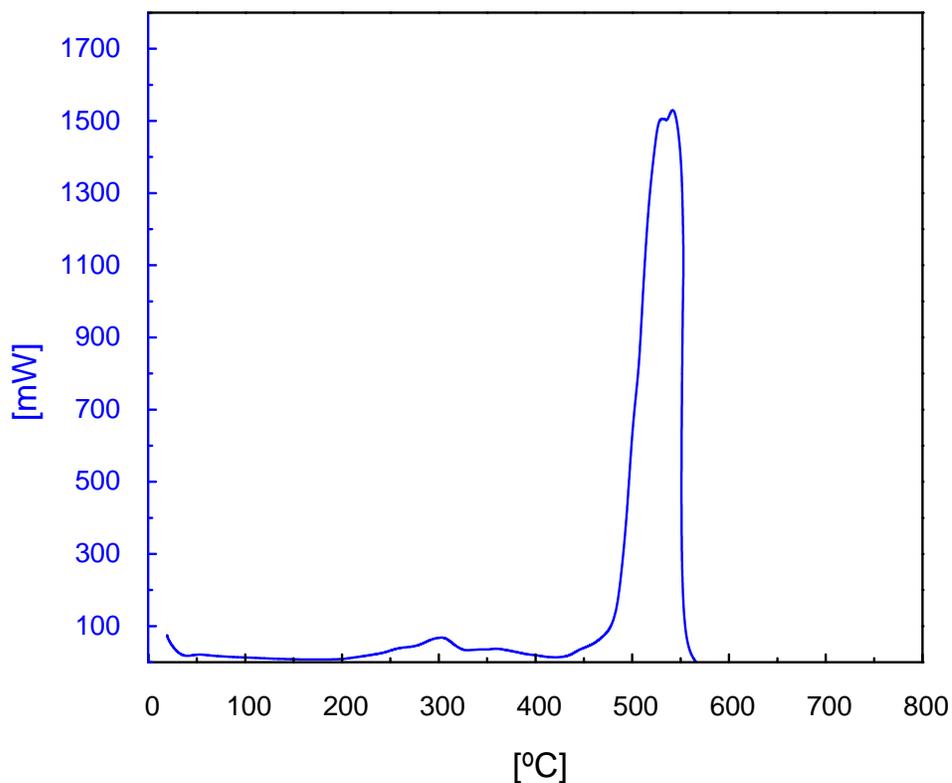


Figura 14. Curva DSC de la banda transportadora. Fuente: Universidad de Pamplona

La Figura 14 muestra los resultados del análisis DCS de la muestra de la banda, la principal característica a determinar mediante esta técnica es la temperatura de transición vítrea, la cual se relaciona con cada tipo de polímero.

En cauchos naturales o sintéticos la temperatura de transición vítrea se encuentra por debajo de los 0°C y desafortunadamente no se cuenta con información en ese rango de temperatura. Solo se observan picos exotérmicos a 300°C asociados a la fusión de los plastificantes y 535°C asociados a la oxidación del caucho estireno-butadieno.

ENSAYO FTIR

En la Figura 15 se presenta el espectro FTIR para la muestra de banda al completo, el hecho que no se haya realizado una extracción cetónica de plastificantes y aditivos de la muestra complica la interpretación del espectro, sin embargo a continuación se presentan los resultados más relevantes:

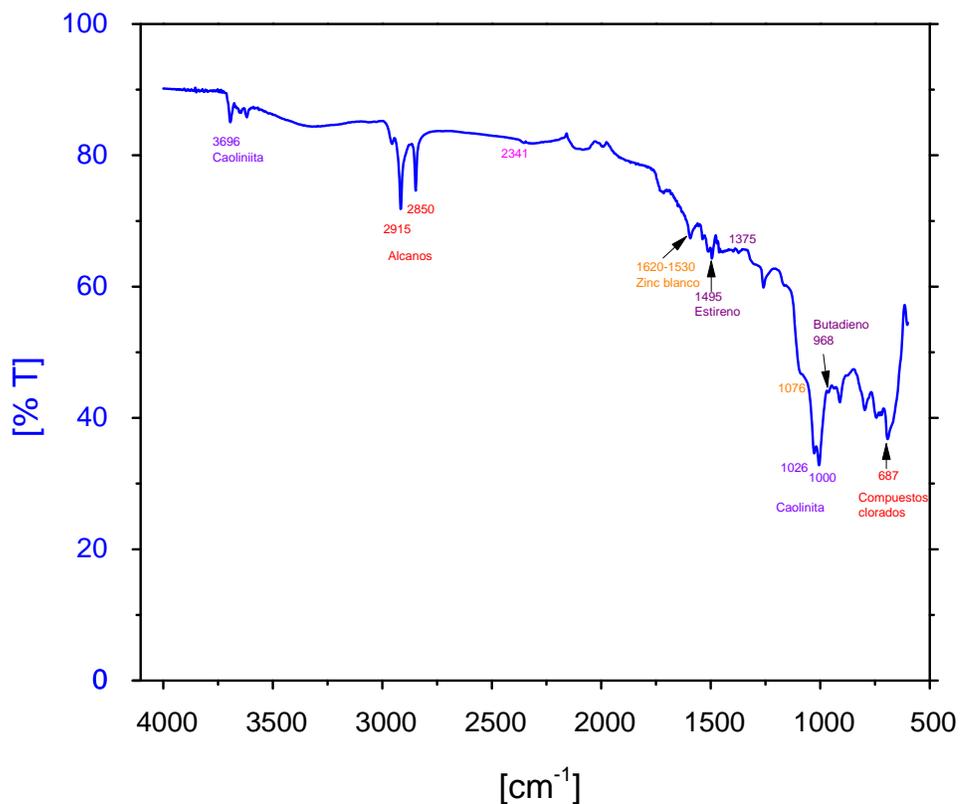


Figura 15. Espectro FTIR de la banda transportadora. Fuente: Universidad de Pamplona

Las bandas que se observan entre 2900-3000 cm^{-1} , se asocian a vibraciones simétricas y asimétricas de los enlaces C-H de los grupos metilo. La banda pequeña en 1375 cm^{-1} , se asocia con vibraciones asimétricas del grupo metilo, las bandas 1495 y 698 cm^{-1} propias del estireno, y la banda 968 cm^{-1} del butadieno (Mente, Te, & Sp, 2016; Zhou, 2011). Las bandas identificadas permiten pensar que el elastómero presente en la muestra es un caucho de estireno-butadieno.

Las bandas entre 2900-3000 cm^{-1} ya descritas, junto con la observada en 687 cm^{-1} , asociada a compuestos clorados, sugieren la presencia de parafinas cloradas, normalmente usadas como plastificantes (Baeza, 2015).

La banda entre 1620 y 1530 cm^{-1} es propia del zinc blanco en un medio de aceite, en este caso el plastificante (Pratali, 2013).

Las bandas que se observan entre 3620 y 3695 cm^{-1} son típicas de grupos hidroxilos internos y/o externos de un mineral. Las bandas de 1026 y 1000 cm^{-1} , y las 700-900 cm^{-1} , sugieren que el mineral pudiese ser la caolinita (Mgbemena et al., 2013).

Los resultados combinados de TGA y FTIR permiten identificar y presentar un análisis semicuantitativo de la muestra comercial estudiada: Aditivos y volátiles de la formulación (8%); plastificantes (4%) con alta probabilidad de que sea un aceite de parafina clorado; elastómero (46%) en esta muestra se ha utilizado caucho estireno-butadieno; negro de humo (12%); y finalmente unos residuos que corresponden a materiales inorgánicos donde se ha identificado como probables compuestos el zinc blanco y la caolinita.

PROPIEDADES MECANICAS Y RESISTENCIA AL FUEGO DE UNA MUESTRA COMERCIAL

A continuación se presentan los resultados encontrados para la muestra comercial.

Tabla 3. Propiedades mecánicas muestra comercial. Fuente: Icobandas S.A

Dureza	70
Densidad del caucho	1,26 mg/ mm ³
Adhesión caucho-caucho	28-42 Lb/pulg
Adhesión caucho-lona	>28 Lb/pulg
Abrasión	211 mm ³
Resistencia a la llama	4 segundos

Con base a los resultados obtenidos se prosigue a realizar la formulación patrón para la empresa Icobandas S.A

FORMULACION PARA ICOBANDAS S.A

Para los ensayos pertinentes a la formulación de una mezcla de caucho auto extingüible se tuvo en cuenta primeramente la materia prima existente en la empresa y si está la posibilidad de ensayar muestras de compuestos nuevos para la creación de este caucho con características ignífugas. Después se procedió a realizar los ensayos de formulaciones propuestas y describir la utilización de los componentes de esa formulación.

En las siguientes tablas se describen las formulaciones realizadas con sus respectivos componentes, en la mayoría se hace uso de caucho SBR al igual que la muestra comercial pero finalmente se decide cambiar este caucho SBR por caucho natural ofreciéndole a la formulación mejores propiedades mecánicas.

Tabla 4. Base elastómera. Fuente: Autor

Formulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SBR 1502 (phr)	80	60	50	50	50	60	60	40	40	40	40	
Caucho nitrilo 34% (phr)	20	20	10	10	10							
Caucho butadieno (phr)		20	40	40	40	20	20	40	40	40	40	50
Neopreno (phr)						20	20	20	20	20	20	20
Caucho natural (phr)												30

Tabla 5. Agentes reforzantes. Fuente: Autor

Formulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Negro de Humo (phr)	10	15	15	15	15	15	15	15	55	55	55	70
Sílice (phr)	30	30	30	30	40	30	30	30	15	10	10	10

Tabla 6. Sistema de vulcanización. Fuente: Autor

Formulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Azufre (phr)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,75
Óxido de zinc (phr)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Ácido esteárico (phr)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TBBS (phr)	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1
TMTD (phr)	0,25	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,1

Tabla 7. Antidegradantes. Fuente: Autor

Formulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TMQ (phr)	0,5	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
6PPD (phr)	1	2	2	2		2	2	2	2	2	2	2

Tabla 8. Retardantes de llama. Fuente: Autor

Formulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Trihidrato de alúmina (phr)	80	80	80	80	40	80	70	70	70	70	70	50
Borato de zinc (phr)	10	10	10	10	10	10	10	15	10	15	15	15
Parafina clorada (phr)	5	5		5	10	5	5	5	15	10	10	20

Tabla 9. Lubricantes. Fuente: Autor

Formulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aceite nafténico (phr)											20	15
Aceite antillama (phr)									20	20		

FORMULACION 1

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: Se realizó de acuerdo a la norma ISO 340 con ayuda de un mechero de bunsen. Se expuso una muestra de caucho a la llama de un mechero bunsen , después de 1 minuto el quemador se retiró y se registró la duración de la llama dándonos para este ensayo un tiempo de 3 segundos, se observó que el caucho no se deterioró tanto por parte de la llama, no dejó brasa y tampoco liberó humo. Por tanto se puede afirmar que cumplió con la propiedad de resistencia a la llama.



Figura 16. Prueba resistencia al fuego etapa final ensayo 1. Fuente: Icobandas S.A

Abrasiveidad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Ecuación 3:

$$\text{Indice de abrasión} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final (mg)}}{\text{densidad} \left(\frac{\text{mg}}{\text{mm}^3}\right)} * \frac{200}{183}$$

Tabla 10. Datos abrasión ensayo 1. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm3)	Índice de Abrasión (mm3)
1	3062	2653	1,26	354,75
2	3080	2687	1,26	340,87
3	3080	2673	1,26	353,02

En promedio se tendría que la abrasión de esta primera fórmula fue de:

$$\text{Índice Prom} = \frac{354,75 + 340,87 + 353,03}{3} = 349,55$$

Se tiene que un excelente índice de abrasión será por debajo de 110, y un índice de abrasión bueno estará por debajo de 200 mm³ según la norma ISO 4649, lo que nos lleva a pensar que se obtuvo una abrasión demasiado deficiente, justificando estos resultados con la cantidad de retardantes empleados ya que se utilizó 80 phr de trihidrato de alúmina, lo que se espera es poder mejorar este resultado de abrasión porque la propiedad de resistencia al fuego resultó de una manera muy aceptable.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 66 shore A. Es un resultado muy óptimo para la dureza (Friedenthal, 1993).

Reometría: En el primer ensayo la gráfica de reometría quedo de la siguiente forma:

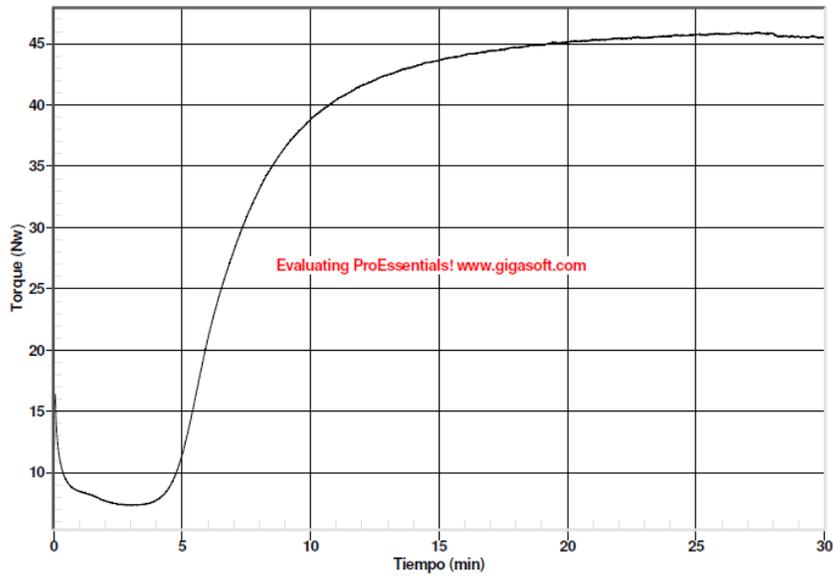


Figura 17. Reometría del ensayo 1 durante 30 minutos. Fuente: Icobandas S.A

Se confirma el tiempo de vulcanización entre 4:38 y 12:34 minutos, con un torque máximo de aproximadamente 46 Newton, además se puede observar que no hay posibilidad de que el caucho tenga reversión. Por otro lado se puede concluir que necesita más cantidad de acelerantes para tener una buena vulcanización y lograr una reometría en 15 minutos que es el valor ya definido en la empresa.

Resistencia a la fatiga (Flex):

Tabla 11. Resistencia a la fatiga ensayo 1. Fuente: Icobandas S.A

Ciclos	1630	3260	4890	6520	8150	9780	11410	13040	16300	19560
Muestra/Tiempo (Min)	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
A (mm)	0	0	0	2,1	4,9	18	18,5	19,4	20,1	Rota
B (mm)	0	0	0	2,8	6,8	21,2	Rota	Rota	Rota	Rota
Rota (mm)	17	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota

Se puede notar con los resultados que el caucho que está inicialmente con una fisura se comienza a dañar ahí mismo y que a los 10 minutos ya está totalmente rota, lo cual no es favorable pues no da un tiempo de reacción largo para notificar el daño en caso de que estuviera en la banda, por otro lado aquellas muestras que no tenían ninguna fisura se empezaron a dañar al minuto 20 es decir a los 6520 ciclos lo cual en parte es un buen resultado debido a la cantidad de químicos que contiene la fórmula, aunque se esperaría que tuviera un daño a los 30 minutos aproximadamente para considerar el resultado como favorable según el artículo "Study of the fatigue behavior of a synthetic rubber" (Cruanes, Lacroix, Berton, Méo, & Ranganathan, 2015) y a la vez se podría asegurar una buena resistencia a la fatiga si la muestra con fisura no se hubiera dañado completamente al minuto 10. Finalmente se puede decir que se debe mejorar la resistencia a la fatiga.

Prueba de Adhesión:

Se evaluó la adhesión entre el caucho y nylon 150 dándonos para la adhesión caucho-caucho una presión de 110 Bar, aplicando los datos en la ecuación 2 tenemos que

$$Adhesión = \frac{(110 - 50) \frac{Lb}{Pulg^2} * (2,236) Pulg^2}{4 cm} * \frac{2,54 cm}{pulg} = 85,19 \frac{Lb}{Pulg}$$

Los resultados de adhesión del caucho-lona se hallan de la misma manera, dando así:

$$\text{Adhesión} = \frac{(110 - 50) \frac{\text{Lb}}{\text{Pulg}^2} * (2,236) \text{ Pulg}^2}{4 \text{ cm}} * \frac{2,54 \text{ cm}}{\text{pulg}} = 85,19 \frac{\text{Lb}}{\text{Pulg}}$$

Los resultados son favorables ya que los reportados por la norma ISO 14890:2003 definen como valor mínimo de adhesión $25,7 \frac{\text{Lb}}{\text{pulg}}$ y en este caso dio muy por encima de este valor, por tanto se puede decir con seguridad que tiene una buena adhesión caucho-caucho y caucho-lona.

En una segunda oportunidad se evaluó la adhesión con poliéster 125 dándonos para la adhesión caucho-caucho una presión de 115 Bar, aplicando los datos en la ecuación 2 tenemos que

$$\text{Adhesión} = \frac{(115 - 50) \frac{\text{Lb}}{\text{Pulg}^2} * (2,236) \text{ Pulg}^2}{4 \text{ cm}} * \frac{2,54 \text{ cm}}{\text{pulg}} = 92,29 \frac{\text{Lb}}{\text{Pulg}}$$

Los resultados de adhesión del caucho-lona se hallan de la misma manera, dando así:

$$\text{Adhesión} = \frac{(115 - 50) \frac{\text{Lb}}{\text{Pulg}^2} * (2,236) \text{ Pulg}^2}{4 \text{ cm}} * \frac{2,54 \text{ cm}}{\text{pulg}} = 92,29 \frac{\text{Lb}}{\text{Pulg}}$$

Los resultados son favorables ya que los reportados por la norma ISO 14890:2003 definen como valor mínimo de adhesión $25,7 \frac{\text{Lb}}{\text{pulg}}$ y en este caso dió $92,29 \frac{\text{Lb}}{\text{pulg}}$; por tanto se puede decir con seguridad que tiene una buena adhesión caucho-caucho y caucho-lona. Y que en el caso de lona poliéster se tiene una mejor adhesión que con lona nylon, aunque los resultados son muy cercanos.

Finalmente se llegó a la conclusión de que aunque la mayoría de pruebas resultaron con buenos resultados se debe mejorar la propiedad de la abrasión, pues es necesaria una buena abrasión ya que se va a emplear en minería subterránea y debe ser lo suficientemente buena en cuanto a la propiedad de desgaste.

FORMULACIÓN 2:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: se registró la duración de la llama en un tiempo de 6 segundos, se observó que el caucho no se deterioró tanto por parte de la llama, no dejó brasa y tampoco humo. Por tanto se puede afirmar que este ensayo también cumplió con la propiedad de resistencia a la llama.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 12. Datos abrasión ensayo 2. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm ³)	Índice de Abrasión (mm ³)
1	3088	2721	1,26	318,32
2	3061	2744	1,26	274,95
3	3064	2686	1,26	327,86
Promedio				307,04

Con la adición del caucho butadieno y el aumento de negro de humo se logró obtener una mejora en cuanto al valor de abrasión pero aun así este valor es demasiado deficiente por lo que habría que seguir probando más modificaciones para tener una buena propiedad de abrasión. Buscando un valor de aproximadamente 180 mm³ para definir como una abrasión aceptable en términos de resistencia al desgaste en minería subterránea (Norma ISO 4649).

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 75 shore A. Es un resultado un poco alto debido a que una alta dureza me puede significar una mala resistencia a la fatiga (Friedenthal, 1993).

Reometría: para este segundo ensayo tenemos la siguiente reometría.

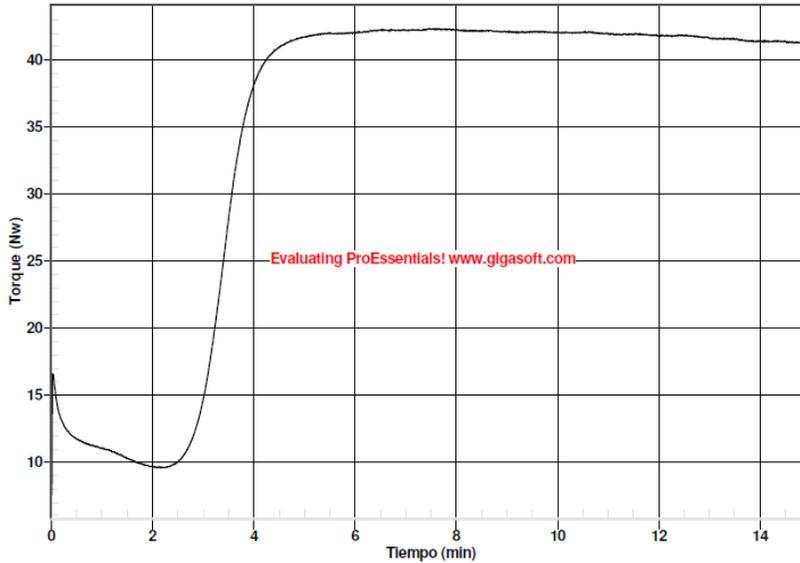


Figura 18. Reometría ensayo 2. Fuente: Icobandas S.A

Para esta segunda reometría tenemos un periodo de inducción de 2:46 minutos y una vulcanización entre 2:46 y 4:06 minutos, además la zona de reversión continua casi estable lo que nos indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 42,36 N considerado como bueno para las demás propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993).

Resistencia a la fatiga (Flex):

Tabla 13. Resistencia a la fatiga ensayo 2. Fuente: Icobandas S.A

Ciclos	1630
Muestra/Tiempo (Min)	5
A	Rota
B	Rota
Rota	Rota

Los resultados obtenidos para este segundo ensayo en cuanto a resistencia a la fatiga fueron demasiado malos pues a los 5 minutos ya se habían dañado las tres muestras, tanto la que tenía fisura como las que no tenían. Haciendo necesario mejorar considerablemente la resistencia a la fatiga pues esto indicaría que en cuanto el caucho pase por poleas no durara mucho tiempo.

FORMULACIÓN 3:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: Se realizó de acuerdo a la norma ISO 340 con ayuda de un mechero de bunsen. Se expuso una muestra de caucho a la llama de un mechero bunsen, después de 1 minuto el quemador se retiró y se registró la duración de la llama dándonos para este ensayo que no se apagó nunca, por el contrario ardió y lanzó muchísimas chispas, lo que nos llevó a descartar ésta formulación dando como resultado que este ensayo no cumplió con la propiedad de resistencia a la llama, probablemente por la falta de la parafina clorada.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 14. Datos abrasión ensayo 3. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm3)	Índice de Abrasión
1	2973	2656	1,26	274,95
2	2973	2661	1,26	270,62
3	2989	2666	1,26	280,16
Promedio				275,24

Con la adición del caucho butadieno se logró obtener una mejora en cuanto al valor de abrasión pero la propiedad de resistencia a la llama no se cumple, y aunque la propiedad a la abrasión mejoró no es lo suficientemente buena como para seguir haciendo modificaciones a ésta fórmula.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 73 shore A. Es un resultado un poco alto debido a que una alta dureza me puede significar una mala resistencia a la fatiga.

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

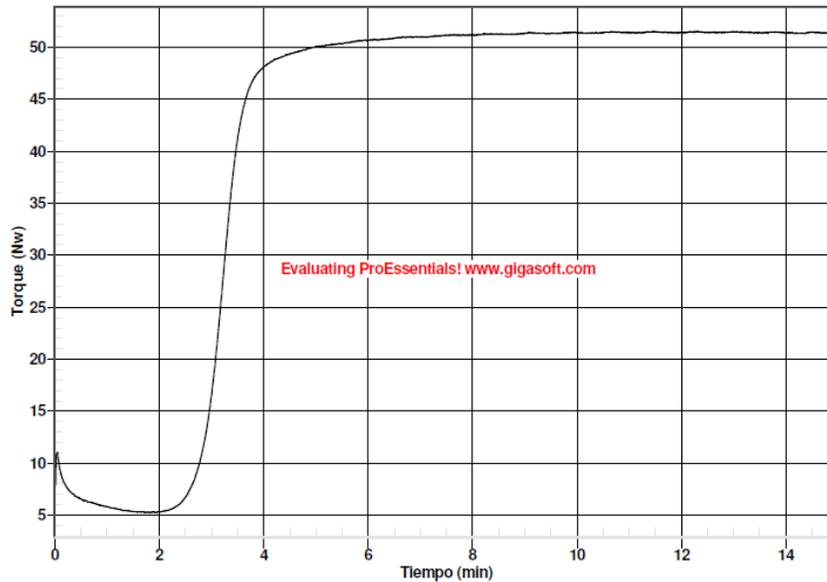


Figura 19. Reometría ensayo 3. Fuente: Icobandas S.A

Para esta tercera reometría tenemos un periodo de inducción de 2:34 minutos y una vulcanización entre 2:34 y 3:49 minutos, además la zona de reversión continua casi estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 51,54 N considerado como bueno para las demás propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993).

Se decide no realizar más pruebas de propiedades mecánicas pues las primeras dos fueron fallidas. Se espera lograr el balance entre la abrasión y la propiedad de resistencia a la llama.

FORMULACIÓN 4:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: Se realizó de acuerdo a la norma ISO 340 con ayuda de un mechero de bunsen. Se expuso una muestra de caucho a la llama de un mechero bunsen, después de 1 minuto el quemador se retiró y se registró la duración de la llama dándonos para este ensayo que no se apagó, y al igual que en la formulación anterior ardió y lanzó muchas chispas, lo que nos llevó a la conclusión de que la parafina clorada no influye en el resultado, pero que probablemente la cantidad que se añadió de caucho butadieno si pudo haber afectado para que no se cumpliera la propiedad de resistencia a la llama.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 15. Datos abrasión ensayo 4. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm3)	Índice de Abrasión
1	3036	2697	1,26	294,04
2	3053	2716	1,26	292,30
3	3039	2698	1,26	295,77
Promedio				294,04

Con la adición de parafina clorada la abrasión se aumentó un poco, analizando de esta forma que aquellos compuestos empleados como retardantes de llama pueden hacer que la propiedad de abrasión se dañe, además a pesar de que se añadió la parafina clorada se tuvo como respuesta a la propiedad de resistencia a la llama que no se apaga, probablemente le hace falta mayor cantidad de parafina clorada o evaluar las cantidades de retardantes de llama sin que afecte la propiedad de la abrasión.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 75 shore A. Es un resultado un poco alto debido a que una alta dureza me puede significar una mala resistencia a la fatiga (Friedenthal, 1993).

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

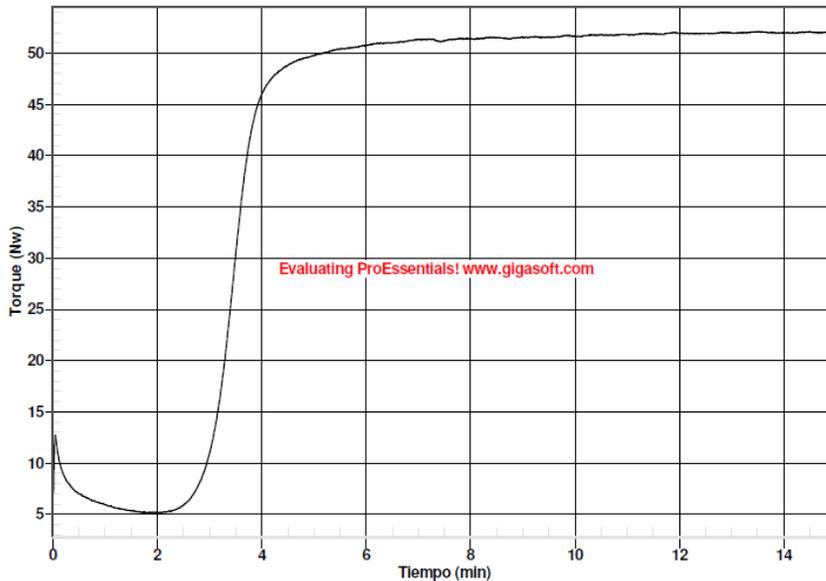


Figura 20. Reometría ensayo 4. Fuente: Icobandas S.A

Para esta reometría tenemos un periodo de inducción de 2:43 minutos y una vulcanización entre 2:43 y 4:11 minutos, además la zona de reversión continua casi estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 52,13 N considerado como bueno para las demás propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993).

Se decide no realizar más pruebas de propiedades mecánicas pues las primeras dos al igual que en el ensayo 3 fueron fallidas.

FORMULACIÓN 5:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: Se realizó de acuerdo a la norma ISO 340 con ayuda de un mechero de bunsen. Se expuso una muestra de caucho a la llama de un mechero bunsen, después de 1 minuto el quemador se retiró y se registró la duración de la llama dándonos para este ensayo que no se apagó, además ardió muchísimo más que los dos ensayos anteriores y

lanzó chispas, lo que nos llevó a la conclusión de que la parafina clorada no compensa la disminución de la alúmina y por tanto se debe volver a tener en cuenta la cantidad inicial de alúmina.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 16. Datos abrasión ensayo 5. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm3)	Índice de Abrasión
1	2980	2740	1,26	208,17
2	2979	2737	1,26	209,90
3	2955	2725	1,26	199,49
Promedio				205,85

Con la disminución de la alúmina la propiedad de la abrasión mejoró considerablemente pero la propiedad de resistencia a la llama no mejoró, además habría que sumarle al resultado el hecho de que no se utilizaron ni antioxidantes ni antiozonantes en este ensayo, lo que también pudo atribuir en la mejora de la abrasión. Por tal motivo podemos decir con seguridad que los compuestos empleados como retardantes de llama hacen que la propiedad de abrasión sea deficiente.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 78 shore A. Es un resultado alto ocasionando probablemente una mala resistencia a la fatiga (Beatty, 1964).

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

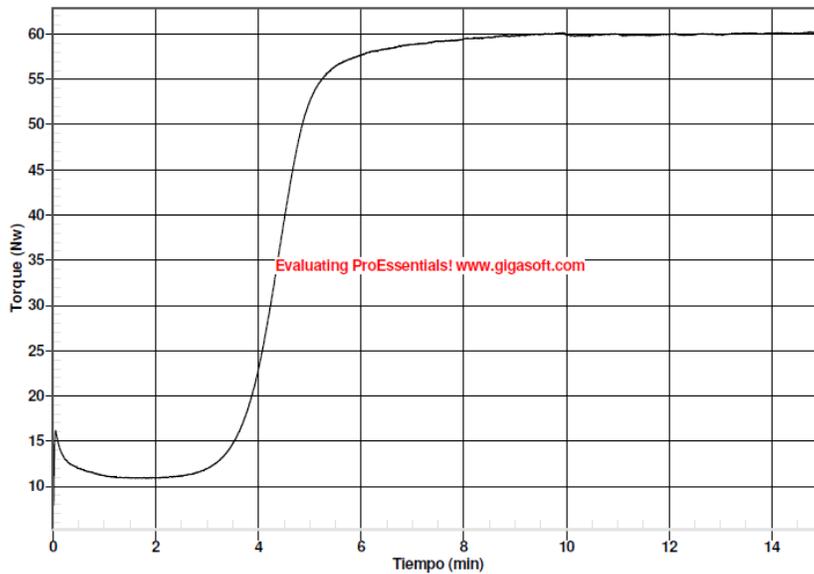


Figura 21. Reometría ensayo 5. Fuente: Icobandas S.A

Para esta quinta reometría tenemos un periodo de inducción de 3:15 minutos y una vulcanización entre 3:15 y 5:17 minutos, además la zona de reversión continua casi estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 60,23 N considerado como bueno para las demás propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993).

Se decide no realizar más pruebas de propiedades mecánicas pues las primeras propiedades de resistencia a la llama y resistencia a la abrasión fueron fallidas.

FORMULACIÓN 6:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: Se realizó de acuerdo a la norma ISO 340 con ayuda de un mechero de bunsen. Se expuso una muestra de caucho a la llama de un mechero bunsen, después de 1 minuto el quemador se retiró y se registró la duración de la llama dándonos para este ensayo que se apagó inmediatamente, además no botó humo y no salieron chispas. Al

realizar el cambio de caucho nitrilo por caucho neopreno se evidenció que la resistencia a la llama mejoró significativamente.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 17. Datos abrasión ensayo 6. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm3)	Índice de Abrasión
1	3173	2803	1,26	320,92
2	3183	2779	1,26	350,42
3	3178	2802	1,26	326,13
Promedio				332,49

Con la cantidad de alúmina inicial y el cambio de caucho nitrilo por neopreno la propiedad de la abrasión empeoró un poco pero la propiedad de resistencia a la llama si mejoró tanto que se apaga inmediatamente. Aunque la propiedad de abrasión no es buena se deben seguir realizando cambios para lograr una buena abrasión y al mismo tiempo una buena resistencia a la llama.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 72 shore A. Es un resultado alto que provocar baja resistencia a la fatiga (Friedenthal, 1993).

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

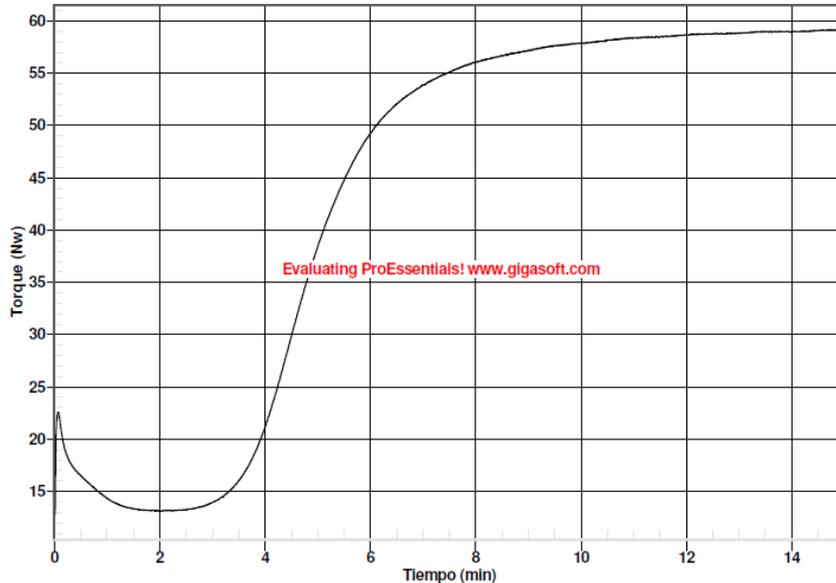


Figura 22. Reometría ensayo 6. Fuente: Icobandas S.A

Para esta reometría tenemos un periodo de inducción de 3:20 minutos y una vulcanización entre 3:20 y 7:16 minutos, además la zona de reversión se observa como si quisiera estar continua, es decir, estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 59,18 N considerado como bueno para las demás propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993).

Se decide no realizar más pruebas de propiedades mecánicas pues la resistencia a la abrasión da muy deficiente.

FORMULACIÓN 7:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: Se realizó de acuerdo a la norma ISO 340 con ayuda de un mechero de bunsen. Se expuso una muestra de caucho a la llama de un mechero bunsen, después de 1 minuto el quemador se retiró y se registró la duración de la llama de 13 segundos, además

no botó humo y no salieron chispas. Al disminuir la cantidad de alúmina en un porcentaje pequeño afectó la propiedad de resistencia a la llama, pues se apaga a los 13 segundos cuando se apaga en el ensayo anterior inmediatamente. Esto quiere decir que se debe equilibrar mejor los porcentajes de los retardantes de llama.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 18. Datos abrasión ensayo 7. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm ³)	Índice de Abrasión
1	3210	2881	1,26	285,36
2	3190	2847	1,26	297,51
3	3157	2814	1,26	297,51
Promedio				293,46

Con la disminución de una pequeña cantidad de alúmina la propiedad de abrasión mejoró un poco, es decir que entre más alúmina lleve la fórmula la propiedad de abrasión se verá más afectada pero al mismo tiempo entre menor cantidad de alúmina tenemos que la propiedad de resistencia a la llama se ve perjudicada, demorándose más de los 10 segundos que me exige la norma ISO 340 y el cambio de caucho nitrilo por neopreno la propiedad de la abrasión empeoró un poco pero la propiedad de resistencia a la llama si mejoró tanto que se apaga inmediatamente. Aunque la propiedad de abrasión no es buena se deben seguir realizando cambios para lograr una buena abrasión y al mismo tiempo una buena resistencia a la llama.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 70 shore A. Es un resultado bueno por tanto se evaluó la resistencia a la fatiga para verificar los tiempos en que se daña el caucho completamente (Friedenthal, 1993).

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

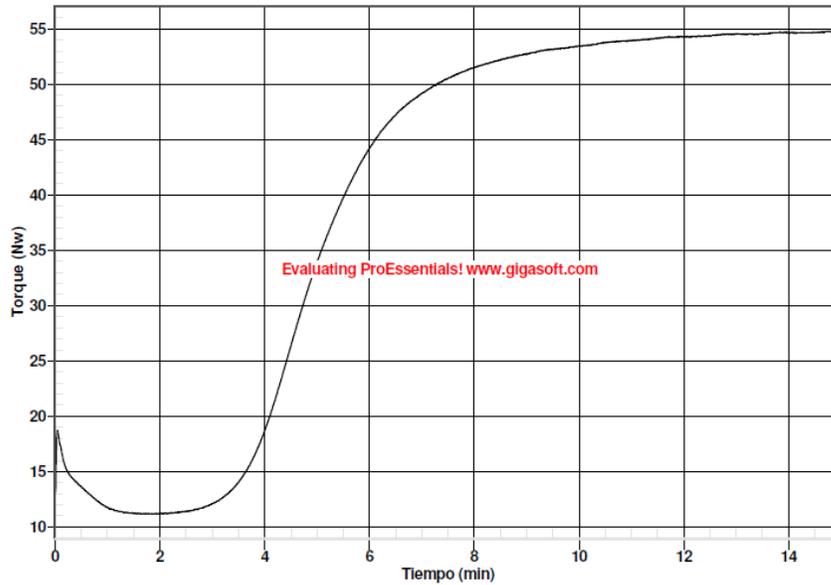


Figura 23. Reometría ensayo 7. Fuente: Icobandas S.A

Para esta reometría tenemos un periodo de inducción de 3:20 minutos y una vulcanización entre 3:20 y 7:29 minutos, además la zona de reversión se observa como si quisiera estar continua, es decir, estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 55,83 N considerado como bueno para las demás propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993).

Resistencia a la fatiga (Flex):

Tabla 19. Resistencia a la fatiga ensayo 7. Fuente: Icobandas S.A

Ciclos	1630	3260	4890	6520	8150	9780
Muestra/Tiempo (Min)	5	10	15	20	25	30
A (mm)	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2
B (mm)	13,1	18,3	21,1	21,8	22,7	24,2
Rota (mm)	18,5	20,5	24,2	24,2	24,2	24,2

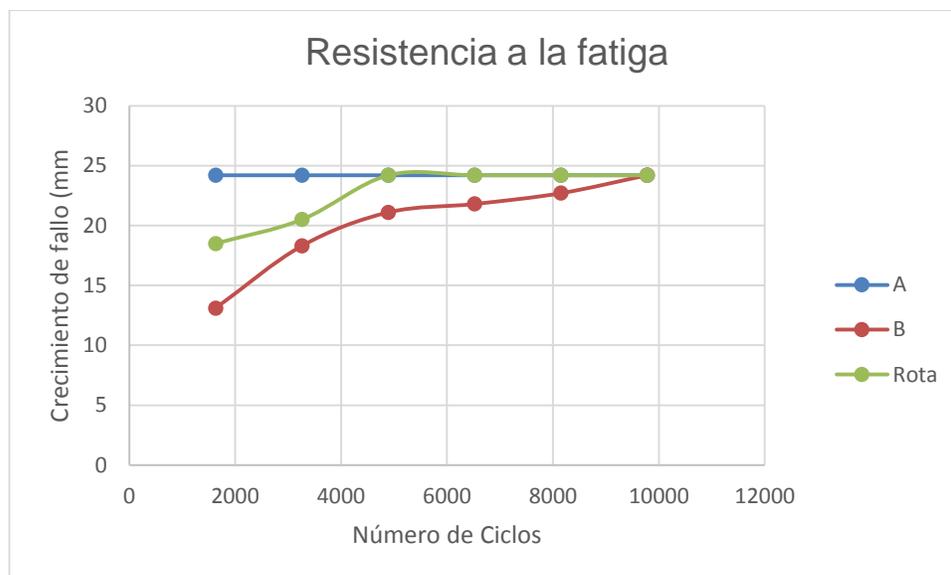


Figura 24. Resistencia a la fatiga ensayo 7. Fuente: Icobandas S.A

Con los resultados se puede observar que a pesar de que el caucho tenía una dureza no muy alta la resistencia a la fatiga no dió tan buena, pero también los resultados no arrojan datos un poco erróneos pues no es posible que se dañe primero la muestra A que no tiene fisura a aquella muestra rota que si tiene fisura, probablemente no se colocaron las muestras bien

en el equipo de resistencia a la fatiga, por otro lado analizando la muestra B tenemos resultados un poco favorables, pues a pesar de que la prueba es demasiado crítica y demandante, ésta muestra duró 25 minutos sin romperse completamente, lo que analizando nos da unos buenos resultados en cuanto a resistencia a la fatiga de una muestra sin fisura. La muestra con fisura por otro lado duró un tiempo de 10 minutos los cuales podemos tomar como un buen resultado pues indica que durará un tiempo aproximadamente bueno hasta antes de romperse completamente (Cruanes et al., 2015).

FORMULACIÓN 8:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: se registró una duración de la llama de 4 segundos, además no botó humo, no dejó brasa y no salieron chispas. Al disminuir la cantidad de alúmina en un porcentaje pequeño y aumentar la cantidad de borato de zinc se pudo notar su efecto sinérgico pues en estas cantidades la duración de la llama se disminuyó de 13 segundos a 4 segundos, estando así dentro del tiempo que exige la norma ISO 340. Concluyendo así que la propiedad de resistencia a la llama fue pasada.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 20. Datos abrasión ensayo 8. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm ³)	Índice de Abrasión
1	3252	2932	1,26	277,56
2	3240	2922	1,26	275,82
3	3216	2890	1,26	282,76
Promedio				278,71

Con la disminución de una pequeña cantidad de alúmina y el aumento de una pequeña cantidad de borato de zinc se logró un efecto sinérgico entre estos dos retardantes de llama que lograron disminuir en un poco el valor de la abrasión pasándolo de 293 a 278 mm³ no

es mucha la diferencia pero se espera que aunque sea poco a poco se logre bajar ese valor de abrasión hasta unos 180 mm³. Hasta este ensayo se puede decir que poco a poco se ha bajado la abrasión de casi 350 a 278 sin afectar la propiedad de la resistencia a la llama y cumpliendo la normativa de la ISO 340.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 73 shore A. Debido a que la dureza da un poco alta no se decide hacer la prueba de resistencia a la fatiga pues lo más probable es que den resultados negativos (Friedenthal, 1993).

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

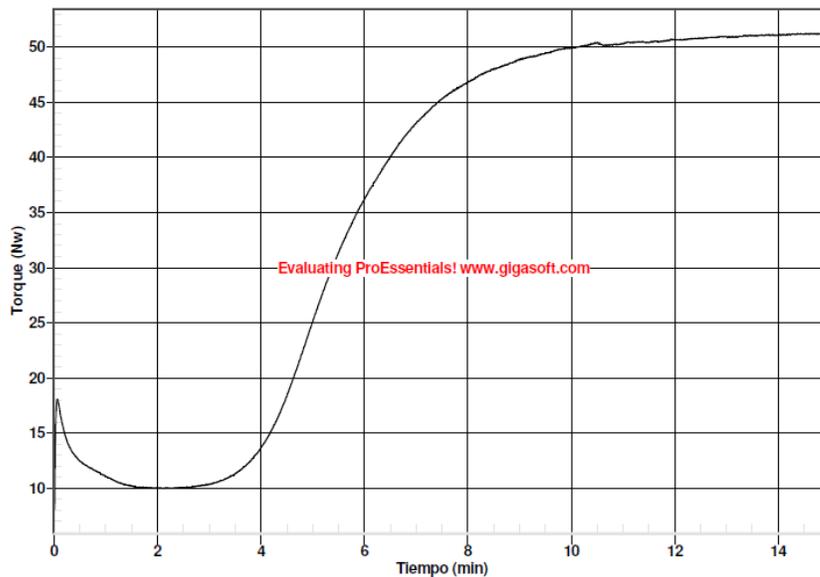


Figura 25. Reometría ensayo 8. Fuente: Icobandas S.A

Para esta reometría tenemos un periodo de inducción de 3:41 minutos y una vulcanización entre 3:41 y 8:08 minutos, además la zona de reversión se observa como si quisiera estar continua, es decir, estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 51,25 N considerado como bueno para las demás propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993).

Como la abrasión sigue dando un poco alta, no se realizan más pruebas mecánicas.

FORMULACIÓN 9:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: se registró la duración de la llama dándonos como resultado que no se apagó, se quería comprobar si la parafina clorada que es plastificante y a la vez retardante de llama podía tener efecto sinérgico con la alúmina y el borato de zinc si se añadía en mayor cantidad que las formulas anteriores, pero se logró evidenciar que con esas cantidades la propiedad de resistencia a la llama no se cumple, por tanto se debe tener en cuenta si de pronto con menos cantidad o por el contrario con más cantidad si haría que la muestra se apagara dentro del rango de tiempo que exige la norma ISO 340.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 21. Datos abrasión ensayo 9. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm ³)	Índice de Abrasión
1	3100	2840	1,36	208,93
2	3128	2854	1,36	220,18
3	3100	2834	1,36	213,75
			Promedio	214,29

En este ensayo se realizaron varios cambios al mismo tiempo, uno de ellos fue aumentar la cantidad de negro de humo para mejorar la abrasión, también se aumentó la parafina clorada para ayudar como retardante de llama y plastificante, y evaluar el resultado con respecto a la abrasión, el borato de zinc se disminuyó 5 phr para observar si con el aumento de la parafina el efecto de la propiedad a la llama sigue igual o no, y se añadió aceite antillama para mejorar la dureza y evitar que se aumente pues con el uso de grandes cantidades de negro de humo se espera un producto con una mayor dureza (Baeza, 2015), por tanto se espera contrarrestar este efecto con ayuda del aceite antillama y además

obtener una buena resistencia a la fatiga. Al realizar todos estos cambios se logró observar una mejora en la abrasión pero no fue muy significativa, sin embargo la propiedad de resistencia a la llama se vió perjudicada, por tanto se esperan hacer mejoras pequeñas para saber que compuesto influye tanto en la abrasión como en la resistencia al fuego.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 75 shore A.

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

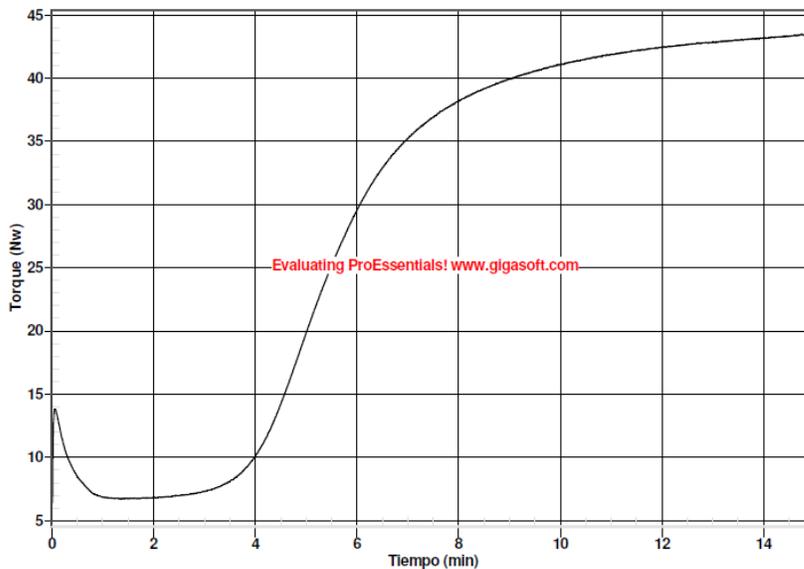


Figura 26. Reometría ensayo 9. Fuente: Icobandas S.A

Para esta reometría tenemos un periodo de inducción de 3:42 minutos y una vulcanización entre 3:42 y 8:54 minutos, además la zona de reversión se observa como si quisiera estar continua, es decir, estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 43,50 N considerado como bueno para las demás propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993).

Resistencia a la fatiga (Flex):

Tabla 22. Resistencia a la fatiga ensayo 9. Fuente: Icobandas S.A

Ciclos	1630	3260	4890
Muestra/Tiempo (Min)	5	10	15
A (mm)	0	10,3	Rota
B (mm)	20,4	Rota	Rota
Rota (mm)	18,1	21,6	Rota

Se puede observar que los resultados nos muestran una resistencia a la fatiga muy deficiente pues a los 15 minutos ya todas las muestras se han dañado (Beatty, 1964), se esperaba una mejora debido al uso del aceite antillama pero por lo visto el aceite no influyó mucho para dar una buena resistencia a la fatiga, por ahora por lo menos se sabe que las muestras no se rompen en los primeros 5 minutos de prueba. Se espera mejorar esta resistencia a la fatiga con el uso de menos carga química en la formulación.

FORMULACIÓN 10:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: se registró la duración de la llama dándonos como resultado que no se apaga, no dejó brasa, ni bota chispas. La disminución de sílice por tanto afectó la propiedad de resistencia a la llama, dándonos como no satisfactoria la resistencia al fuego.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 23. Datos abrasión ensayo 10. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm3)	Índice de Abrasión
1	3040	2733	1,36	246,70
2	3033	2743	1,36	233,04
3	3050	2770	1,36	225,00
Promedio				234,91

Durante este ensayo se evaluó si la cantidad de sílice afectaba en algo la resistencia al fuego y si se mejora en algo la resistencia al desgaste y la fatiga, dando como resultado que la resistencia al fuego no fue dañada, la resistencia a la abrasión da todavía un poco alta pero no tanto como al inicio y se espera ver que la resistencia a la fatiga haya mejorado porque se le disminuyó carga química de la sílice. Por tanto se puede decir que la resistencia a la abrasión está en un valor un poco bueno pero se debe disminuir aún más.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 72 shore A.

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

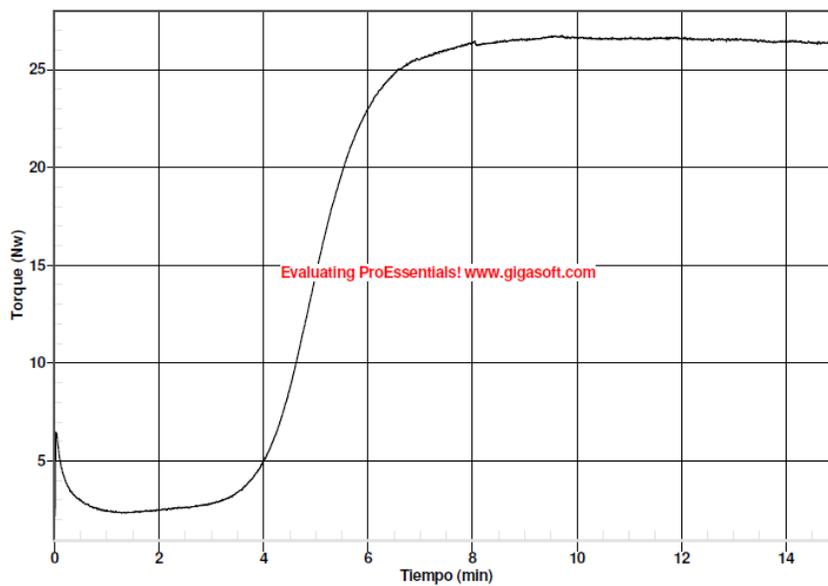


Figura 27. Reometría ensayo 10. Fuente: Icobandas S.A

Para esta reometría tenemos un periodo de inducción de 3:51 minutos y una vulcanización entre 3:51 y 6:20 minutos, además la zona de reversión se observa como si quisiera estar continua, es decir, estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de

26,74 N considerado como aceptable para las demás propiedades mecánicas , pues se sabe que cuando los torques son menores de 40 N las propiedades como la resistencia a la tensión no son muy buenas según la literatura (Friedenthal, 1993).

Resistencia a la fatiga (Flex):

Tabla 24. Resistencia a la fatiga ensayo 10. Fuente: Icobandas S.A

Ciclos	1630	3260	4890	6520	8150	9780
Muestra/Tiempo (Min)	5	10	15	20	25	30
A (mm)	4,8	17,2	Rota	Rota	Rota	Rota
B (mm)	7,1	14,1	20,1	22,5	23,6	Rota
Rota (mm)	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota

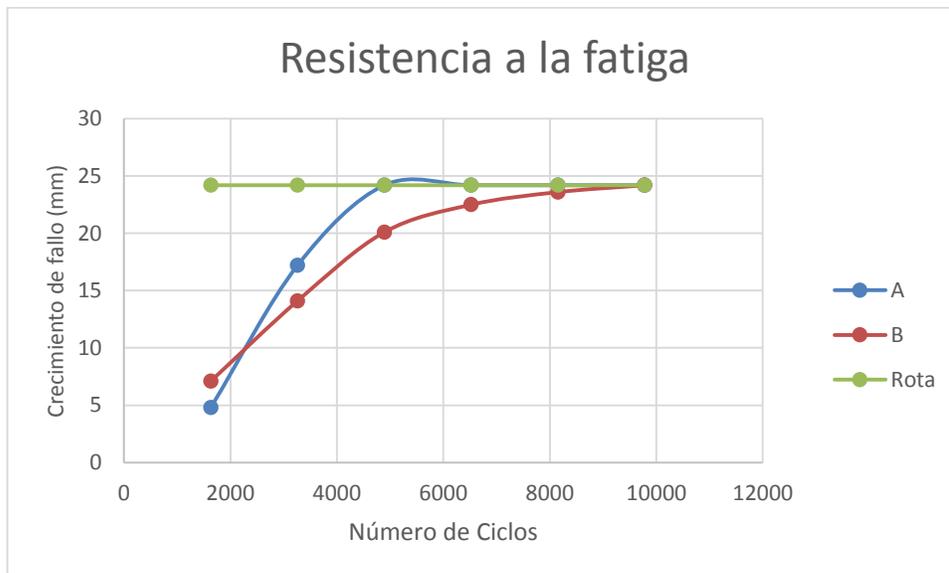


Figura 28. Resistencia a la fatiga ensayo 10. Fuente: Icobandas S.A

Se puede observar que los resultados nos muestran una resistencia a la fatiga muy deficiente para la muestra con fisura pues se daña a los 5 minutos es decir a los 1630 ciclos, es decir en caso de fisura en la banda está se dañará supremamente rápido en comparación con aquellas que no tienen fisura, por otro lado la muestra A no dura más de 15 minutos, pues se rompe en su totalidad en este tiempo pero se podría decir que tiene una resistencia a la fatiga aceptable, y la muestra B que tampoco tiene fisura si pasó los 8150 ciclos es decir 25 minutos considerándolo como una buena resistencia a la fatiga después del minuto 20 pues es una prueba un poco exigente para estas muestras.

FORMULACIÓN 11:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: se registró la duración de la llama obteniendo que la muestra hace por apagarse pero que no se apaga nunca, no dejó brasa, ni botó chispas. El cambio de aceite probablemente influyó en que no se apagara ya que es un derivado del petróleo, pero los resultados fueron favorables pues la muestra hace por apagarse y eso significa que debe agregarse un poco más de alúmina por ejemplo y esperar que se apague y pueda cumplir con la resistencia al fuego, por el momento cumplió esta propiedad pero se espera mejorarla un poco más.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 25. Datos abrasión ensayo 11. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm ³)	Índice de Abrasión
1	2914	2694	1,35	178,10
2	2914	2697	1,35	175,67
3	2916	2706	1,35	170,00
			Promedio	174,59

Con los resultados se puede observar que el cambio de aceite influyó muchísimo en cuanto a la propiedad de abrasión, dándonos una abrasión considerablemente buena para el uso en minería subterránea, diciendo de esta manera que se logró cumplir finalmente con una resistencia al desgaste supremamente buena, por el momento se debe mejorar la resistencia a la llama sin perjudicar demasiado la resistencia a la abrasión y así tener una formulación final que cumpla con todas las normas ISO exigidas.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 70 shore A.

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

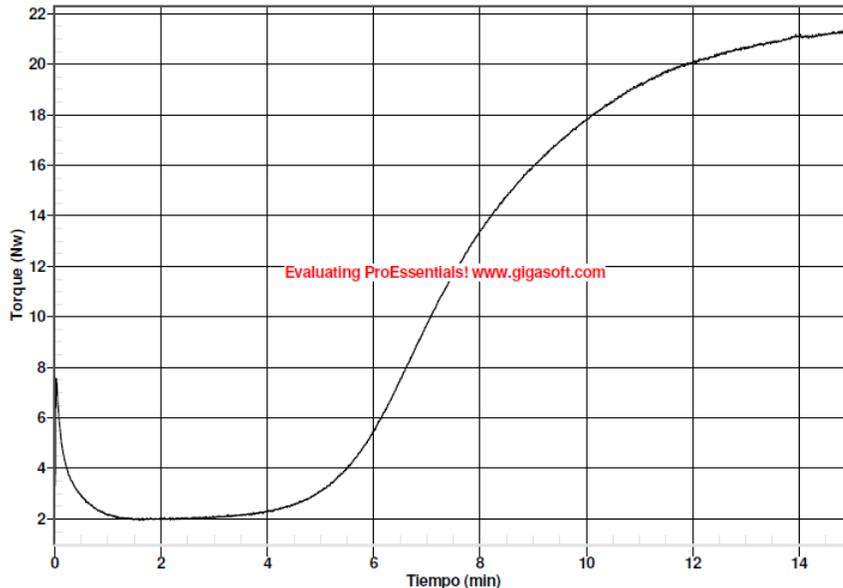


Figura 29. Reometría ensayo 11. Fuente: Icobandas S.A

Para esta reometría tenemos un periodo de inducción de 5:29 minutos y una vulcanización entre 5:29 y 11:11 minutos, además la zona de reversión se observa como si quisiera estar continua, es decir, estable lo que no indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos por tanto una excelente reometría con un torque máximo de 21,32 N considerado como aceptable para las demás propiedades mecánicas, pues se sabe

que cuando los torques son menores de 40 N las propiedades como la resistencia a la tensión no son muy buenas (Friedenthal, 1993).

Resistencia a la fatiga (Flex):

Tabla 26. Resistencia a la fatiga ensayo 11. Fuente: Icobandas S.A

Ciclos	1630	3260	4890	6520	8150	9780	11410	13040	16300	19560
Muestra/Tiempo (Min)	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
A (mm)	0	0	0	0	0	6,7	16,8	19,5	Rota	Rota
B (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rota (mm)	14	16,6	17,5	18,8	19,7	20	21,1	Rota	Rota	Rota

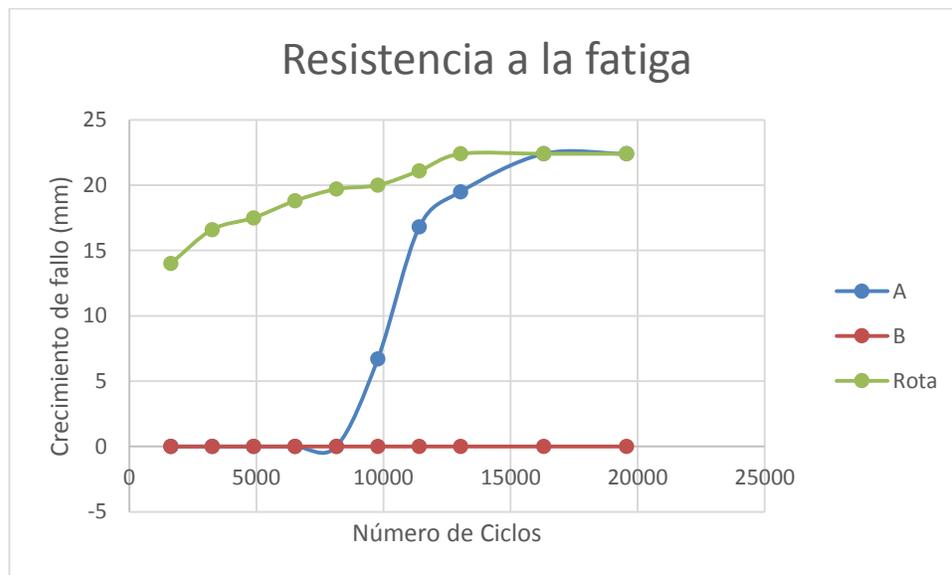


Figura 30. Resistencia a la fatiga ensayo 11. Fuente: Icobandas S.A

Se puede observar que en este ensayo con el cambio de aceite se obtuvo una excelente resistencia a la fatiga para las tres muestras analizadas, esto es muy satisfactorio pues ya se sabe que aunque el aceite antillama contiene fosfatos (Kenneth & Maguire, 2008) y nos ayuda a evitar la propagación de la llama no nos colabora mucho con las propiedades mecánicas, mientras que el aceite nafténico ayuda a que la llama se propague nos da unas excelentes características mecánicas como lo fue la resistencia al desgaste o abrasión y la resistencia a la fatiga dio excelente, se puede notar que aquella muestra con fisura se demora 50 minutos en romperse completamente y que además el tiempo en el que se va dañando es demasiado bueno, pues sobre pasa el tiempo estipulado como 20 minutos para obtener una buena resistencia a la fatiga, por otro lado las otras dos muestras (A y B) también nos dan excelentes resultados, donde la muestra A también se demora 50 minutos en romperse completamente, pero la muestra que mejores resultados dió fue la B pues durante la prueba a 60 minutos no sufrió daño alguno, cuando se sabe que es una prueba demasiado exigente para el caucho. Por tanto se decide mejorar la resistencia al fuego pues en estas dos características de resistencia a la abrasión y resistencia a la fatiga los resultados fueron supremamente excelente

FORMULACIÓN 12:

CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Resistencia al fuego: se registró la duración de la llama obteniendo que la muestra se apaga inmediatamente, no dejó brasa, no botó chispas y no se deterioró. Se logró comprobar que con una cantidad menor de trihidrato de alúmina la muestra se apaga y no se deteriora, obteniendo así unos resultados favorables pues la muestra se apaga inmediatamente cumpliendo la norma ISO 340.

Abrasividad: Se tomaron 3 muestras y se les hizo la prueba de abrasión teniendo en cuenta la ecuación 3.

Tabla 27. Datos abrasión ensayo 12. Fuente: Icobandas S.A

Muestra	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Densidad (mg/mm ³)	Índice de Abrasión
1	3050	2820	1,34	187,58
2	3051	2823	1,34	185,95
3	3038	2816	1,34	181,06
Promedio				184,86

Con los resultados se puede observar que el cambio de caucho SBR por natural y el aumento de negro de humo influyó muchísimo en cuanto al resultado de abrasión, obteniendo así un resultado muy óptimo de 184 mm³, dándonos una abrasión considerablemente buena para el uso en minería subterránea según la norma ISO 4649, diciendo de esta manera que se logró cumplir finalmente con una buena propiedad de resistencia al desgaste. Por el momento se ha logrado cumplir con la propiedad de resistencia al desgaste y resistencia a la llama, considerando esta formulación como una formulación final que cumpla con todas las normas ISO exigidas.

Dureza: En este test la dureza encontrada fue de 78 shore A. Un resultado un poco alto pero que puede ser aceptado al no presentar malos resultados de resistencia a la fatiga.

Reometría: para este ensayo tenemos la siguiente reometría.

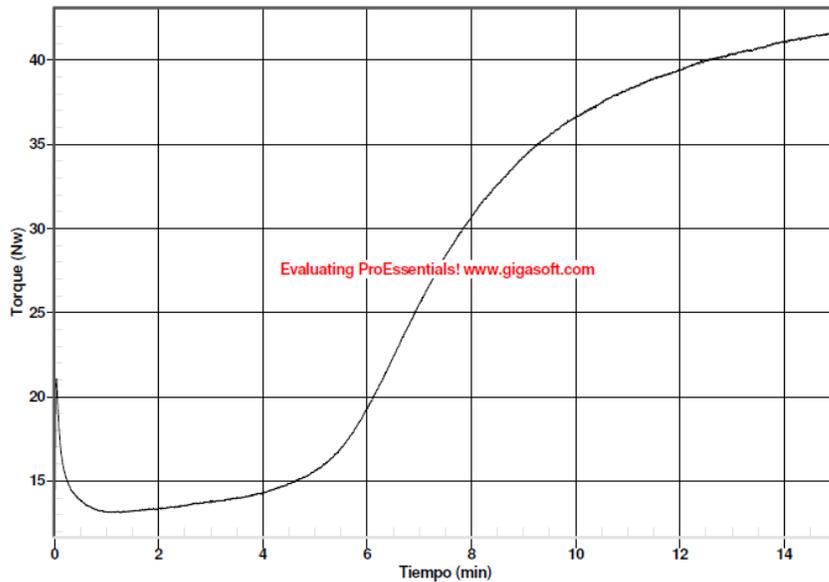


Figura 31. Reometría ensayo 12. Fuente: Icobandas S.A

Para esta reometría tenemos un periodo de inducción de 4:41 minutos y una vulcanización entre 4:41 y 11:24 minutos, además la zona de reversión se observa como si quisiera estar estable lo que indica que no podrá existir reversión en cuanto a la vulcanización, y dándonos finalmente una buena reometría con un torque máximo de 41,66 N considerado como aceptable para las demás propiedades mecánicas, pues se sabe que cuando los torques son menores de 40 N las propiedades como la resistencia a la tensión no son muy buenas (Friedenthal, 1993).

Resistencia a la fatiga (Flex):

Tabla 28. Resistencia a la fatiga ensayo 12. Fuente: Icobandas S.A

Ciclos	1630	3260	4890	6520	8150	9780	11410	13040	16300	19560
Muestra/Tiempo (Min)	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
A (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rota (mm)	10,9	11,6	12,2	13,3	13,6	13,8	14,7	14,8	15,3	18,2

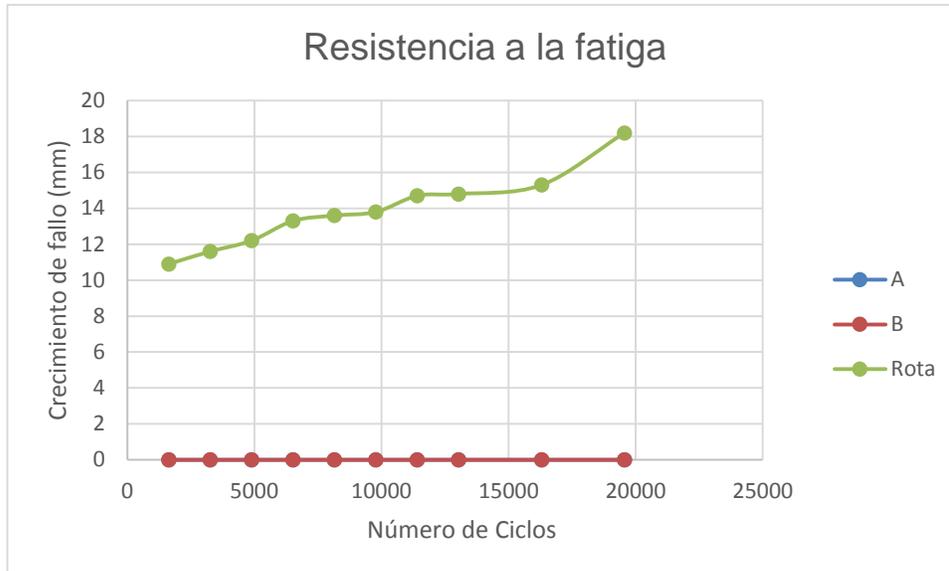


Figura 32. Resistencia a la fatiga ensayo 12. Fuente: Icobandas S.A

Se puede observar que en este ensayo se obtuvo una excelente resistencia a la fatiga para las tres muestras analizadas, esto es muy satisfactorio y se le atribuye al cambio de caucho SBR por caucho natural, ya que por la teoría se sabe que este caucho natural confiere excelentes propiedades de resistencia a la fatiga en la mayoría de formulaciones de mezclas de caucho. Se observa también a partir de estos resultados que la muestra con fisura en el transcurso de los 60 minutos que dura la prueba no se rompe por completo y que el crecimiento del fallo es bastante lento pues logra completar la prueba sin dañarse por completo, por otra parte si observamos las muestras A y B se logra observar un resultado excelente pues en el transcurso de la prueba no hubo crecimiento de fisuras, es decir no se observó ningún daño en ninguna de estas muestras. Cumpliendo finalmente la prueba de resistencia a la fatiga de una manera excelente.

Prueba de Adhesión:

Se evaluó la adhesión entre el caucho y nylon 150 dándonos para la adhesión caucho-caucho una presión de 120 Bar, aplicando los datos en la ecuación 2 tenemos que

$$Adhesión = \frac{(120 - 50) \frac{Lb}{Pulg^2} * (2,236) Pulg^2}{3,9 cm} * \frac{2,54 cm}{pulg} = 101,93 \frac{Lb}{Pulg}$$

Los resultados de adhesión del caucho-lona se hallan de la misma manera, dando así:

$$Adhesión = \frac{(120 - 50) \frac{Lb}{Pulg^2} * (2,236) Pulg^2}{3,9 cm} * \frac{2,54 cm}{pulg} = 101,93 \frac{Lb}{Pulg}$$

Los resultados son favorables ya que se sabe que para la norma ISO 14890:2003 se tiene como valor mínimo de adhesión $25,7 \frac{Lb}{pulg}$ y en este caso dio muy por encima de este valor, por tanto se puede decir con seguridad que tiene una buena adhesión caucho-caucho y caucho-lona.

En una segunda oportunidad se evaluó la adhesión con poliéster 125 dándonos para la adhesión caucho-caucho una presión de 115 Bar, aplicando los datos en la ecuación 2 tenemos que

$$Adhesión = \frac{(120 - 50) \frac{Lb}{Pulg^2} * (2,236) Pulg^2}{4 cm} * \frac{2,54 cm}{pulg} = 99,39 \frac{Lb}{Pulg}$$

Los resultados de adhesión del caucho-lona se hallan de la misma manera, dando así:

$$Adhesión = \frac{(120 - 50) \frac{Lb}{Pulg^2} * (2,236) Pulg^2}{4 cm} * \frac{2,54 cm}{pulg} = 99,39 \frac{Lb}{Pulg}$$

Los resultados son favorables y por tanto se puede decir con seguridad que tiene una buena adhesión caucho-caucho y caucho-lona. Y que en el caso de lona nylon se tiene una mejor adhesión que con lona poliéster, aunque los resultados entre los dos tipos de lonas son muy semejantes.

Finalmente se llegó a la conclusión de que esta formulación cumplió con todas las características buscadas y por tanto será la formulación patrón de este trabajo de grado.

A continuación se observa una tabla en donde se puede comparar los resultados de las doce formulaciones, logrando así comparar cada una de estas y determinar cuál de todas las formulaciones fue la que mejores resultados arrojó.

Tabla 29. Comparación de resultados entre formulaciones. Fuente: Autor

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tiempo	3 S	6 S				1 S	13 S	4 S				1 S
Deterioro	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	Si	No	No	No
Llama	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No
Brazas	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	Si	No	No	No
Humo	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	Si	No	No	No
Resistencia al desgaste	349,55	307,05	275,25	294,04	205,86	332,49	293,46	278,72	214,29	225,00	174,59	184,87

Con los resultados obtenidos se determinó que la formulación número 12, sería la formulación final pues cumplió con las primeras pruebas a diferencia de las otras 11 formulaciones de una manera muy exitosa, por tanto a esta formulación se le decidió realizar un diseño de experimentos que se realiza según el Dr. Taguchi por medio de un diseño ortogonal, el cual es usado para producir los mejores parámetros para el diseño óptimo del proceso, con el mínimo número de experimentos. Los resultados obtenidos para los arreglos ortogonales son analizados para obtener en primer lugar una estimación a la contribución de los factores individuales que influyen en la calidad en la etapa del diseño del

producto y en segundo lugar en ganar la mejor condición para un proceso o un producto, así que las características en una buena calidad puedan ser sostenidas.

Tabla 30. Factores del diseño de experimentos ortogonal. Fuente: Autor

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Rango del Factor
Negro de humo	50	70	20
ATH	40	50	10
Borato Zn	10	15	5
Aceite	15	25	10

Tabla 31. Diseño de experimentos. Fuente: Autor

Paso 1						Paso 2		
Factores controlables L8							Abrasión	
Negro de humo	ATH	Interacción A y B	Borato Zn	Interacción A y D	Interacción A y G	Aceite		
A	B	C	D	E	F	G		
1	1	1	1	1	1	1	174,92	
1	1	1	2	2	2	2	163,93	
1	2	2	1	1	2	2	180,13	
1	2	2	2	2	1	1	187,06	
2	1	2	1	2	1	2	252,70	
2	1	2	2	1	2	1	173,19	
2	2	1	1	2	2	1	196,03	
2	2	1	2	1	1	2	159,31	
Paso 3							Gran Promedio	185,91

En el paso 1 se tiene el arreglo ortogonal con los cuatro factores controlables y sus respectivas interacciones.

Paso 2: se coloca la propiedad mecánica que se pretende evaluar

Paso 3: Se realiza un promedio de los ocho experimentos realizados

Paso 4: se realiza la suma de cada nivel por separado y al final se hace una suma de los dos niveles.

Paso 4

Suma nivel 2	781,22	722,53	793,07	683,49	799,72	713,27	756,06
Suma nivel 1	706,05	764,74	694,19	803,77	687,54	773,99	731,20
Total	1487,26	1487,26	1487,26	1487,26	1487,26	1487,26	1487,26

Paso 5: se debe restar a la suma total del nivel 2 la suma total del nivel 1

Paso 5

(Suma nivel 2)-(Suma nivel 1)	75,17	-42,21	98,88	-120,28	112,18	-60,72	24,86
-------------------------------	-------	--------	-------	---------	--------	--------	-------

Paso 6: Sacar el promedio a la suma del nivel 1 y a la suma del nivel 2 por separado. En un diseño de experimentos ortogonal se tiene que existen 4 valores de nivel 1 y cuatro valores de nivel 2, se debe dividir el promedio entre cuatro.

Paso 6

Promedio suma nivel 2	195,30	180,63	198,27	170,87	199,93	178,32	189,02
Promedio suma nivel 1	176,51	191,18	173,55	200,94	171,89	193,50	182,80

Paso 7: Se determina los efectos de cada nivel. Se realiza una resta entre el promedio de la suma del nivel 1 menos el gran promedio y de la misma manera para el efecto del nivel 2.

Paso 7

Efecto de bajo nivel (1)	-9,40	5,28	-12,36	15,03	-14,02	7,59	-3,11
Efecto de alto nivel (2)	9,40	-5,28	12,36	-15,03	14,02	-7,59	3,11
Efecto	18,79	-10,55	24,72	-30,07	28,05	-15,18	6,22

El efecto total será determinado por la resta entre el efecto del nivel 2 menos el efecto del nivel 1.

Paso 8: se debe construir una tabla ANOVA que contenga grados de libertad, suma de cuadrados, valor cuadrado medio y el % de contribución.

$$Suma\ de\ cuadrados = S = \frac{[(Suma\ nivel\ 1) - (Suma\ nivel\ 2)]^2}{Número\ de\ observaciones}$$

El número de observaciones será de 8 para un diseño ortogonal.

$$Valor\ cuadrado\ medio = \frac{Suma\ de\ cuadrados}{Grados\ de\ libertad}$$

$$\% \text{ Contribución} = \frac{Suma\ individual\ de\ cuadrados}{Total\ suma\ de\ cuadrados} * 100$$

De esta manera se tiene la siguiente tabla ANOVA:

Tabla 32. ANOVA del diseño de experimentos. Fuente: Autor

Paso 8	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Valor cuadrado medio	% Contribución
	df			
Negro de humo	1,00	706,37	706,37	11,64
ATH	1,00	222,73	222,73	3,67
Interacción A y B	1,00	1222,18	1222,18	20,13
Borato Zn	1,00	1808,30	1808,30	29,79
Interacción A y D	1,00	1573,07	1573,07	25,91
Interacción A y G	1,00	460,81	460,81	7,59
Aceite	1,00	77,28	77,28	1,27
Error	0,00	0,00		
Total	7,00	6070,74	6070,74	100,00

De esta tabla se tiene que los mayores porcentajes de contribución que se encuentran son inicialmente la cantidad de borato de zinc añadido a la muestra, así como también la interacción entre el negro de humo con borato de zinc y el negro de humo con el trihidrato de alúmina.

Paso 9: Para establecer un factor de confianza en el diseño y para determinar si otros factores deben ser agrupados en error, se debe probar su significación estadística. La prueba que usaremos se llama prueba F.

$$F = \frac{\text{Valor cuadrático medio}}{\text{Cuadrado medio de error}}$$

$$\text{Cuadrado medio del error} = \frac{\text{Suma factores con menor \%Contribución}}{\text{Grados de libertad}}$$

Tabla 33. Factor de confianza del diseño de experimentos. Fuente: Autor

	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Valor cuadrado medio	% Contribución	Paso 9
	df				F
Negro de humo	1,00	706,37	706,37	11,64	285,86
ATH	1,00	222,73	222,73	3,67	90,14
Interacción A y B	1,00	1222,18	1222,18	20,13	494,61
Borato Zn	1,00	1808,30	1808,30	29,79	731,81
Interacción A y D	1,00	1573,07	1573,07	25,91	636,61
Interacción A y G	1,00	460,81	460,81	7,59	186,49
Aceite	1,00	77,28	77,28	1,27	31,28
Error	2,00	4,94	2,47		
Total	7,00	6070,74		100,00	
Error estándar	1,57				

Aquí finalmente tenemos que el aceite y el trihidrato de alúmina son los factores con menor porcentaje de contribución y por ende quiere decir que estos factores son aquellos que menos influyen en la propiedad de abrasión.

Ecuación predictiva:

$$\text{Respuesta} = \alpha_0 + \alpha_1 (A - A1) + \alpha_2 (B - B2) + \dots + \alpha_n (Z - Zn)$$

Donde:

$$\alpha_0 = \text{Gran promedio} = 185,9080$$

$$\alpha_1 \dots \alpha_n = \frac{\text{Efecto del factor}}{\text{Rango de Factor}}$$

$$A1, B2 \dots Zn = \text{Punto medio del rango del factor}$$

Ecuación predictiva para la propiedad de abrasión:

$$\text{Abrasión} = 185,91 + \frac{18,79}{20} * (A - 10) + \frac{(-30,07)}{5} * (C - 2,5)$$

Donde:

$A = \text{Negro de humo}$

$C = \text{Borato de zinc}$

No se tiene en cuenta el ATH ni el aceite porque su % de contribución es muy bajo, dándonos como resultado que para la propiedad de abrasión su cantidad no influye significativamente.

De la misma manera se tiene un diseño de experimentos para la propiedad de dureza.

Tabla 34. Factores del diseño de experimentos. Fuente: Autor

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Rango del Factor
Negro de humo	50	70	20
ATH	40	50	10
Borato Zn	10	15	5
Aceite	15	25	10

Tabla 35. Diseño de experimentos para la propiedad de dureza. Fuente: Autor

Factores controlables L8							Dureza
Negro de humo	AT H	Interacción A y B	Borato Zn	Interacción A y D	Interacción A y G	Aceite	
A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	65
1	1	1	2	2	2	2	66
1	2	2	1	1	2	2	63
1	2	2	2	2	1	1	70
2	1	2	1	2	1	2	75
2	1	2	2	1	2	1	70
2	2	1	1	2	2	1	72
2	2	1	2	1	1	2	70
Gran Promedio							68,88

Tabla 36. Factor de confianza para el diseño de experimentos. Fuente: Autor

	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Valor cuadrado medio	% Contribución	
	df				F
Negro de humo	1	66,13	66,13	60,73	575,95
ATH	1	0,13	0,13	0,11	1,09
Interacción A y B	1	3,13	3,13	2,87	27,22
Borato Zn	1	0,13	0,13	0,11	1,09
Interacción A y D	1	28,13	28,13	25,83	244,97
Interacción A y G	1	10,13	10,13	9,30	88,19
Aceite	1	1,13	1,13	1,03	9,80
Error	2	0,23	0,11		
Total	7	108,88		100,00	
Error estándar	0,34				

Con estos resultados se obtuvo que los factores con mayor influencia en la propiedad de dureza fue el negro de humo y la interacción entre el negro de humo y el aceite, y aquellos

con menos influencia en esta propiedad fueron el ATH y el borato de zinc. La ecuación predictiva para la dureza será la siguiente:

$$Dureza = 68,88 + \frac{5,75}{20} * (A - 10)$$

La ecuación queda en función de la cantidad de negro de humo porque es el factor con mayor influencia en la dureza, los demás factores no se tienen en cuenta por su bajo % de contribución.

Para realizar el diseño de experimentos con respecto a la propiedad de resistencia a la fatiga se colocó como resultado el tiempo en que tardó la muestra en tener su primera grieta, en un tiempo de 60 minutos como tiempo óptimo, y 30 minutos como valor aceptable.

Tabla 37. Factores del diseño de experimentos. Fuente: Autor

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Rango del Factor
Negro de humo	50	70	20
ATH	40	50	10
Borato Zn	10	15	5
Aceite	15	25	10

Tabla 38. Diseño de experimentos para la propiedad de resistencia a la fatiga. Fuente: Autor

Factores controlables L8							Resistencia a la fatiga
Negro de humo	AT H	Interacción A y B	Borato Zn	Interacción A y D	Interacción A y G	Aceite	
A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	60
1	1	1	2	2	2	2	25
1	2	2	1	1	2	2	60
1	2	2	2	2	1	1	60
2	1	2	1	2	1	2	5
2	1	2	2	1	2	1	20
2	2	1	1	2	2	1	15
2	2	1	2	1	1	2	10
Gran Promedio							31,88

Tabla 39. Factor de confianza para el diseño de experimentos de la propiedad de resistencia a la fatiga. Fuente: Autor

	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Valor cuadrado medio	% Contribución	
	df				F
Negro de humo	1	3003,13	3003,13	74,21	2287,67
ATH	1	153,13	153,13	3,78	116,65
Interacción A y B	1	153,13	153,13	3,78	116,65
Borato Zn	1	78,13	78,13	1,93	59,51
Interacción A y D	1	253,13	253,13	6,25	192,82
Interacción A y G	1	28,13	28,13	0,69	21,42
Aceite	1	378,13	378,13	9,34	288,04
Error	2	2,63	1,31		
Total	7	4046,88		100,00	
Error estándar	1,15				

Para la propiedad de resistencia a la fatiga se tienen como factores con mayor porcentaje de influencia el negro de humo y el aceite, y aquellos que no influyen en esta propiedad fueron el borato de zinc y la interacción entre negro de humo y aceite, es decir que las cantidades empleadas de negro de humo con respecto al aceite no me van a afectar la propiedad de resistencia a la fatiga y las cantidades empleadas de borato de zinc no me ocasionan daños en esta propiedad. La ecuación predictiva para la resistencia a la fatiga será:

$$\text{Resistencia a la fatiga} = 31,88 + \frac{-38,75}{20} * (A - 10) + \frac{-13,75}{10} * (D - 5)$$

La ecuación queda en función de la cantidad de negro de humo y aceite nafténico porque son los factores con mayor influencia en la resistencia a la fatiga, los demás factores no se tienen en cuenta por su bajo % de contribución.

Con estas fórmulas predictivas se puede saber aproximadamente los valores de abrasión y dureza que pueden ser obtenidos al reemplazar las cantidades de las variables que influyen en estas propiedades con respecto a la formulación patrón que en este caso es la formulación 12. Es decir, por ejemplo, que para esta formulación a mayores cantidades de negro de humo, mayor será su dureza, de la misma manera se puede evaluar para la abrasión, a mayores cantidades de negro de humo mejor será su abrasión.

Durante la experimentación de este diseño de experimentos se tuvo como resultado en los ocho ensayos que todas las muestras pasaron la prueba de resistencia a la llama pues se apagaron inmediatamente cumpliendo de manera satisfactoria la norma ISO 340, pero se espera obtener un producto con poco daño es decir que después de someterse a la llama no se deteriore o su deterioro sea mínimo, por estas razones se dejó establecida la formulación patrón 12 ya que sólo esta formulación cumplió con todas las características exigidas y no sufre un deterioro alto.

COMPARACION DE FORMULACION PATRON CON MUESTRAS DE BANDAS COMERCIALES

Tabla 40. Comparación de propiedades con bandas comerciales. Fuente: Autor

Propiedad	Banda comercial	Banda actual Icobandas S.A	Formulación 12
Dureza	70	66	78
Densidad del caucho	1,26	1,24	1,34
Adhesión caucho-caucho Lb/pulg	28-42	111-132 Coat de LLC 099	101
Adhesión caucho-lona Lb/pulg	>28	---	>101
Abrasión mm ³	211	120	184
Resistencia al fuego	4 Segundos	Inmediatamente	Inmediatamente

En cuanto a dureza tenemos un material con una dureza mayor a las de las muestras comparadas, pero aun con este resultado en dureza se obtiene una excelente resistencia a la fatiga (Beatty, 1964), por lo que la dureza no fue problema en los resultados obtenidos. También tenemos que es un caucho mucho más denso pero aceptable.

La adhesión de cauchos es importante debido a la necesidad de incorporar lona en las bandas transportadoras, la norma ISO 14890:2003 tiene un valor mínimo de $25,7 \frac{Lb}{pulg}$ y tenemos aquí que la banda comercial tiene unos resultados que satisfacen la norma pero de manera mínima, por otro lado la banda actual de Icobandas S.A no tiene resultados favorables de adhesión caucho-caucho o adhesión caucho-lona reportando así solamente la adhesión con un coat empleado para poder cumplir con la normativa, mientras que los resultados de la formulación 12 son muy satisfactorios pues se tiene en promedio una adhesión de $101 \frac{Lb}{pulg}$ la cual está por encima de los estándares mundiales.

Para la propiedad de resistencia al desgaste se puede observar que se tienen unos resultados óptimos en comparación con las dos muestras, pues la banda comercial está por encima del resultado que se obtuvo en la formulación 12 y aunque ésta comparada con la banda actual de Icobandas S.A esta mucho más alta cabe resaltar que también es un resultado aceptable según la norma ISO 4649. Por otro lado la resistencia al fuego de las

tres muestras es aceptable por la norma pero en comparación con de la resistencia a la llama y la resistencia al desgaste tenemos los siguientes resultados: para la banda comercial se tiene que se apaga en un tiempo menor de 5 segundos y no se deteriora mucho, para la banda actual de Icobandas S.A se tiene que se apaga en un tiempo menor de 1 segundo pero sufre un deterioro muy notorio mientras que para la formulación 12 se registró una duración de la llama con un tiempo menor de 1 segundo y no sufre deterioro, por estas razones se puede decir que la mejor formulación entre las tres muestras es la formulación 12 pues no solo cumple la normativa y las propiedades mecánicas sino que también se observa un deterioro mínimo al exponerse al fuego.

En el transcurso de este trabajo de grado se logró evidenciar que se obtiene una buena resistencia a la llama con pérdida de buenas propiedades mecánicas, esto se justifica con el alto contenido de químicos utilizados en las formulaciones ya que a la muestra además de componentes ignífugos debe incorporarse gran cantidad de negro de humo, un sistema de vulcanización (óxido de zinc, ácido esteárico y azufre), antioxidantes, antiozonantes, entre otros. De tal manera que las muestras con propiedades ignífugas llevan gran contenido de químicos que conllevan a una pérdida de propiedades mecánicas como lo son la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga, por eso se realizó una formulación inicial a la que se le fueron modificando componentes y cantidades hasta lograr un balance entre las propiedades mecánicas y la propiedad de resistencia a la llama.

Para lograr inicialmente un caucho resistente al fuego y con buenas propiedades mecánicas se hizo necesario emplear compuestos halogenados tales como los compuestos clorados los cuales son retardantes de fuego adecuados pero que generan según la literatura humos tóxicos al quemarse (Baeza, 2015), subproductos que pueden ser peligrosos y letales para los mineros en los confines relativamente cerrados de una mina subterránea, por tanto se hace necesario emplear cantidades mínimas de compuestos clorados como el caucho neopreno y la parafina clorada que actúa como retardante de llama y plastificante. Puesto que se buscaba obtener un caucho con un mínimo de compuestos clorados se hace uso de compuestos como el trihidrato de aluminio que es un retardante al fuego y un plastificante de fosfato que proporciona al caucho la resistencia al fuego que se busca, en la formulación final (formulación 12) se emplea una cantidad considerable de trihidrato de alúmina que actúa de manera sinérgica con el borato de zinc (otro retardante a la llama) en una relación

de 3,4:1 respectivamente para lograr el efecto de resistencia a la llama, pero también se puede decir que en el transcurso del desarrollo experimental de este trabajo de grado se evidenció que a mayores cantidades de trihidrato de alúmina el caucho sufre poco deterioro cuando es expuesto a la llama (Kenneth & Maguire, 2008), teniendo como un valor óptimo de alúmina 70 phr con lo cual no solo se garantiza una resistencia a la llama sino también poco deterioro de la muestra. Además se puede decir que el trihidrato de alúmina a diferencia de los compuestos clorados produce niveles aceptables de toxicidad y humo por lo que se emplearon grandes cantidades de este compuesto (Goossens, 2006).

Se logró comprobar por medio de la experimentación que aquellos retardantes de llama halogenados (neopreno y parafina clorada) actúan removiendo radicales H+ y OH- en la fase gaseosa de la llama, esto es lo que hace que disminuya la velocidad y proceso de quemado, reduciendo la generación de calor (Weil & Levchik, 2016). Por otra parte tenemos que aquellos retardantes de llama como el trihidrato de alúmina y borato de zinc que son retardantes inorgánicos interfieren con el proceso de quemado mediante procesos físicos como liberación de agua o gases no inflamables que diluyen a los que alimentan el fuego, absorción de calor desde las reacciones que liberan gas (enfriamiento) y producción de una capa no inflamable y resistente en la superficie del material (Gonzales, 2009). De esta manera se logró corroborar que a mayor cantidad de retardantes de llama mejor será el resultado a la llama pero entre más cantidad de carga química tenga la muestra las propiedades mecánicas se verán afectadas.

La resistencia al desgaste es una de las propiedades mecánicas más importantes para evaluar pues de esta depende el deterioro que sufre el caucho con el transcurso del tiempo, con ayuda de los ensayos realizados se logró concretar que el caucho natural con caucho butadieno y neopreno ofrecen mejor resistencia al desgaste que la combinación en la base de caucho SBR, butadieno y neopreno. Otro factor que influye en obtener una buena abrasión es la cantidad de negro de humo utilizada, ya que por nuestro diseño de experimentos se logró evidenciar que a mayor cantidad de negro de humo mayor será la resistencia al desgaste pero a su vez nos interfiere con la dureza, pues se obtendría un producto con buena abrasión pero demasiado duro. Por tanto es recomendable emplear grandes cantidades de negro de humo y trihidrato de alúmina en una relación de 3,4:1 con borato de zinc para obtener una buena resistencia al desgaste y a la llama.

Por otra parte se demostró que el caucho natural en unión con butadieno y neopreno como base elastómera ofrece buenos resultados en cuanto a la propiedad de resistencia a la fatiga, y se sabe por la literatura que el caucho natural con grandes cantidades de negro de humo en una formulación ofrece buenos comportamientos en las propiedades mecánicas (Friedenthal, 1993), a pesar de que la dureza de la formulación 12 es bastante alta se logra evidenciar que la resistencia a la fatiga no se vio perjudicada y por el contrario tiene excelentes resultados.

En cuanto al aceite tenemos que en la literatura se recomienda el uso de aceites derivados de fosfatos (Kenneth & Maguire, 2008) pero se logró comprobar que estos aceites no ofrecen resultados buenos en las propiedades mecánicas, y que con el uso de pequeñas cantidades de aceite nafténico se obtienen buenos resultados en propiedades como la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga, por eso se hace más recomendable no hacer uso de aceites derivados de fosfatos por sus malos resultados en las propiedades mecánicas.

Finalmente podemos decir que se consiguió una formulación adecuada para caucho auto extingible, pues si se logró encontrar un balance entre las cantidades de retardantes de llama y las propiedades mecánicas con el menor contenido de cloro posible, por tanto los resultados obtenidos fueron muy favorables.

5. CONCLUSIONES

En la realización de este trabajo de grado se obtuvo que existe una relación inversamente proporcional con respecto a la cantidad de retardantes de llama y la resistencia al desgaste, pues a mayores cantidades de retardantes de llama se obtienen malos resultados en el índice de abrasión.

Los retardantes de llama en cantidades elevadas no solo muestran su poder ignífugo si no que ayudan a que el material no sufra un daño significativo después de estar expuesto a la llama. Además se evidenció que el trihidrato de alúmina con borato de zinc tiene un efecto sinérgico en una relación de 3,4:1 respectivamente.

La base elastómera debe ir en grandes cantidades compuesta por caucho natural y caucho butadieno pues estos dos tipos de caucho ofrecen buenas propiedades mecánicas.

Los aceites derivados de fosfatos pueden contribuir a una buena resistencia al fuego pero no dan buenos resultados en las propiedades mecánicas.

El diseño de experimentos ortogonal hace referencia a la obtención de las mejores propiedades de un producto terminado, evidenciando que con el uso de grandes cantidades de negro de humo se obtiene un buen índice de abrasión. También se logra concluir que la cantidad de químicos empleados en una muestra puede aumentar la dureza y no necesariamente se obtienen resultados negativos para la resistencia a la fatiga.

6. RECOMENDACIONES

Caracterizar el material obtenido con pruebas de resistencia estática debido a que actualmente en el mercado se debe cumplir con la norma ISO 284, este análisis representa el efecto que se espera lograr con el uso de caucho neopreno en la formulación.

Evaluar el uso de retardantes de llama como el molibdato de zinc con la espera de mejores propiedades mecánicas en especial la resistencia al desgaste.

DQS is member of:



7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amstrong, J. R., & Menon, R. (2001). Minas y canteras. In *Enciclopedia de seguridad y salud en el trabajo* (Vol. 3, pp. 35–40). Retrieved from <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/74.pdf>
- Baeza, A. M. A.-L. (2015). *Investigación de mezclas de caucho, con bajo contenido en cloro para bandas transportadoras con características ignífugas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Beatty, J. R. (1964). Fatigue of Rubber. In *Rubber Chemistry and Technology* (Vol. 37, pp. 1341–1364). <https://doi.org/10.5254/1.3540402>
- Bellas García, R. M. (2012). *Formulación y Caracterización de Materiales Compuestos Integrados por una Matriz de Caucho Estireno-Butadieno (SBR) Reforzada con Nanoarcilla*. Universidade Da Coruña.
- Castro, G. (2008). *Materiales Y Compuestos Para La Industria Del Neumatico. Diciembre*. Retrieved from http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf
- Castro Lopez, C. A., & Castro Molano, L. del P. (2005). *Obtención de un material SBR, nylon y Sílice con características de resistencia al desgaste por abrasión*. Universidad Industrial de Santander. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Cruanes, C., Lacroix, F., Berton, G., Méo, S., & Ranganathan, N. (2015). Study of the fatigue behavior of a synthetic rubber. *INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.11.026>
- Dobrota, D. (2015). Vulcanization of rubber conveyor belts with metallic insertion using ultrasounds. *Procedia Engineering, 100*(C), 1160–1166. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.479>
- Dushi, A., Kongoli, F., Mcbow, I., & Rizaj, M. (2013). Optimization of conveyer belts fire-resistant rubber properties using a mathematical model of desirability functions. *IFAC Proceedings Volumes, 46*(16), 377–384. <https://doi.org/10.3182/20130825-4-US-2038.00058>
- Fajen, J., & Beliczky, L. S. (1993). Industria del caucho. In *Industrias Químicas* (p. 20).
- Fernandez Gracia, J. C. (1991). *Análisis del proceso de adhesión en el sistema caucho sintético-adhesivo de poliuretano*. Universidad de Alicante.
- Friedenthal, E. (1993). *Seminario Internacional: Formulación y compuestos de caucho*. Medellín, Colombia.
- Gonzales, O. (2009). Los retardantes de fuego.
- González Cantú, C. (2003). Componentes involucrados en la formulación de caucho - Plástico. Retrieved September 5, 2016, from

- <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/6744-Componentes-involucrados-en-la-formulacion-de-caucho.html>
- Goossens, J. (2006). Fire resistant rubber composition and hose. <https://doi.org/US2010/0311130A1>
- Herrera Castañeda, F. A. (1839). Vulcanización. México.
- Kenneth, M. A., & Maguire, H. (2008). Non halogenated rubber compounds for use in conveyor belts. United States.
- Lawrence. (2008). Protocolo curso de materiales. Bogotá, Colombia.
- Maier, M. (2014). Polimeros Aspectos Teóricos Elementales. *Polímeros*.
- Mayorga Sánchez, J. Z., & Herrera Riveros, L. K. (2016). Medición de la productividad y potencial exportador a las pymes del sector industria fabricación de productos de caucho y de plástico en la ciudad de Measuring the impact and exporting potential in the medium and small businesses of the rubber and plastic. *Journal of Research in Accounting and Management Science*, 1, 4–27.
- Menis, O., & Rook, H. (1980). *The State-of-the-art of thermal analysis: proceedings of a workshop held at the National Bureau of Standards.pdf*. Washington, D.C.
- Mente, P., Te, M., & Sp, H. (2016). Natural Rubber and Reclaimed Rubber Composites A Systematic Review. *Polymer Sciences*. <https://doi.org/10.4172/2471-9935.100015>
- Mgbemena, C. O., Ibekwe, N. O., Azeez, A., Mohamed, P., Sukumar, R., Ramankuttymenon, A., & Menon, R. (2013). Thermal Behavior and UV Properties of Organomodified Kaolin Oleochemically Derived from Rubber Seed Oils (*Hevea brasiliensis*) and Tea Seed Oils (*Camellia sinensis*), 2013(July), 163–168.
- Ministerio de Minas y Energía. (2009). Así Es La Minería. In *Colombia Minera* (p. 31). Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). Potencial minero colombiano. Bogotá, Colombia.
- Neopreno. (n.d.). Barcelona, España.
- Peel Test. (2016). Retrieved December 5, 2016, from <http://www.testresources.net/applications/by-test-type/peel-test/>
- Peñalosa, A. (2011). Cierre de mina llega después de 4 accidentes - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-4362933>
- Petric, M., Grozav, M., & Iliá, G. (2010). Boron Phosphate Flame-retardant for Certain Resins, 1183–1185.
- Pratali, E. (2013). Zinc oxide grounds in 19th and 20th century oil paintings and their role in picture degradation processes. *Literary Review*.
- Saldarriaga Villa, D. (2011). *Formulaciones de caucho*. Medellín, Colombia.
- Salinero Gervaso, M. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante guide de matlab*. Universidad Carlos III De Madrid, Escuela Politécnica Superior.
- Stupak, P. R., Kang, J. H., & Donovan, J. A. (1991). Fractal analysis of rubber wear surfaces

- and debris. *Materials Characterization*, 27(4), 231–240. [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(91\)90039-7](https://doi.org/10.1016/1044-5803(91)90039-7)
- Urrego, W., & Álvarez, M. (2013). Relación entre el calor de vulcanización y la densidad de entrecruzamiento de mezclas reforzadas de caucho natural colombiano y caucho estireno butadieno (NR-SBR). *Revista Colombiana de Materiales*, 4, 19–25.
- Viera Flores, M. (n.d.). Nuevas Tecnologías de Transporte en Minería Subterránea : Santiago, Chile.
- Weil, E. D., & Levchik, S. V. (2016). *Flame Retardants for Plastics and Textiles. Flame Retardants for Plastics and Textiles*. Hanser.
<https://doi.org/10.3139/9783446430655.fm>
- Yepes, W. U. (n.d.). Efecto del sistema de vulcanización en la cinética de reacción y en las propiedades físico-químicas de un caucho natural Colombiano.
- Zhou, M. (2011). LC-IR Application in polymer industries. *Spectra Analysis*, 51.

DQS is member of:

