

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE
VULCANIZACIÓN DE COMPUESTOS A BASE DE HULE
NATURAL DESTINADOS A LA INDUSTRIA DEL CALZADO**

TESIS

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR**

ALFONSO ESTUARDO TOCK ESCOBAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1996

PROPIEDAD DE

08
T(3855)
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE VULCANIZACIÓN DE COMPUESTOS DE HULE NATURAL DESTINADOS A LA INDUSTRIA DEL CALZADO

tema que me fue asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química.



ALFONSO ESTUARDO TOCK ESCOBAR

PROPIEDAD
L

GUATEMALA

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
Vocal I	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Vocal II	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
Vocal III	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
Vocal IV	Br. Fernando Waldemar De León Contreras
Vocal V	Br. Pedro Ignacio Escalante Pastor
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL
PRIVADO**

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales González
EXAMINADOR	Ing. José Eduardo Calderón García
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Rolando Gálvez Betancourth
SECRETARIO	Ing. Edgar Bravatti Castro

Ciudad de Guatemala, 22 de agosto de 1996.

Dr. Adolfo Gramajo
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Pte.

Estimado Dr. Gramajo:

Adjunto envío a usted el informe final de tesis intitulado "DETERMINACION DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE VULCANIZACION DE COMPUESTOS A BASE DE HULE NATURAL DESTINADOS A LA INDUSTRIA DEL CALZADO", que fuera elaborado por el señor estudiante ALFONSO ESTUARDO TOCK ESCOBAR, con carnet 87-11752, el cual he asesorado y me permito remitírselo para que continúe con los trámites pertinentes para su aprobación.

Al agradecerle su atención, aprovecho la oportunidad para expresarle las muestras de mi alta deferencia.



Ing. Eberto Espina Riano

Colegiado No. 456

Colegio de Ingenieros Quimicos de Guatemala



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 23 de septiembre de 1,996.

Doctor
Adolfo Gramajo
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Doctor Gramajo.

Hago de su conocimiento que he revisado el informe Final de Tesis del estudiante Alfonso Estuardo Tock Escobar; titulado: **DETERMINACION DE LAS CONDICIONES OPTIMAS DE VULCANIZACION DE COMPUESTOS A BASE DE HULE NATURAL DESTINADOS A LA INUDSTRIA DEL CALZADO**, de la cual dejo constancia de mi aprobación para proceder a la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. César García Guerra
REVISOR





FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante; Alfonso Estuardo Tock Escobar, titulado: **DETERMINACION DE LAS CONDICIONES OPTIMAS DE VULCANIZACION DE COMPUESTOS A BASE DE HULE NATURAL DESTINADOS A LA INDUSTRIA DEL CALZADO**, procede a la autorización del mismo.

[Handwritten Signature]
Dr. **Dolfo Ramajo**
DIRECTOR
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
FACULTAD DE INGENIERIA
U.S.A.C.

Guatemala, 11 de octubre de 1,996.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de tesis titulado: **DETERMINACION DE LAS CONDICIONES OPTIMAS DE VULCANIZACION DE COMPUESTOS A BASE DE HULE NATURAL DESTINADOS A LA INDUSTRIA DEL CALZADO**, del estudiante; **Alfonso Estuardo Tock Escobar**, procede a la autorización del mismo.

INPRIMASE:

Ing. Julio Ismael González Podszueck
DECANO



Guatemala, 11 de octubre de 1,996.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

TESIS Y ACTO QUE DEDICO:

A DIOS

Fuente de Vida, Salud y Conocimiento.

A MIS PADRES

Miguel Angel Tock Arias y

Marta Estela Escobar de Tock

*Unicamente gracias a su sacrificio, amor y
comprensión logré culminar mi carrera.*

A MI ESPOSA

Ana Karina Alfaro Aquino.

A MI HIJA

Ana Lucía Tock Alfaro

A MIS HERMANOS

Miguel Angel

Sergio David

Marta Regina

Carlos Alberto

A MIS SOBRINOS

Zonia María, Luis Miguel y Luis Angel Tock Morales.

Sergio Renato y Laura Vanessa Tock Prado.

Rafael Humberto, José Miguel y Claudia Cecilia Tock Paiz.

Y A FAMILIARES Y AMIGOS

Que me brindaron su apoyo durante mi carrera.

CONTENIDO

	Pag.
Glosario.....	i
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	3
3. Justificaciones.....	6
4. Objetivos.....	8
5. Hipótesis.....	9
6. Marco teórico	10
6.1 Materia prima.....	10
6.2 Equipo.....	20
6.3 Descripción del proceso.....	24
7. Fase experimental de la investigación.....	37
7.1 Materiales.....	37
7.2 Equipo.....	37
7.3 Metodología	38
8. Resultados	41
9. Interpretación de resultados	50
10. Verificación de hipótesis.....	57
11. Conclusiones	59
12. Recomendaciones	60
13. Bibliografía	61
Apéndice 1	
Datos experimentales.....	63
Apéndice 2	
Fórmulas patrón	72
Apéndice 3	
Especificaciones de calidad de producto final.....	75
Apéndice 4	
Tabla de propiedades relativas del caucho natural.....	77

GLOSARIO

1. **CALIDAD:** es la totalidad de propiedades y características de un producto o servicio, que le confiere la aptitud para satisfacer necesidades establecidas o implícitas.

2. **CAUCHO NATURAL:** es la coagulación obtenida del exudado de especies de árboles como el Hevea, Manihot, Landolphia, Dichopsis Gutta, etc.; se utiliza como materia prima para fabricación de muchos tipos de artículos y está compuesto por más de 98% de sustancias naturales; el restante 2% lo constituyen químicos utilizados para el proceso de coagulación, el que se efectúa en plantas huleras.

Las propiedades físicas del caucho natural varían con la temperatura. A bajas temperaturas, se vuelve rígido y cuando se congela en estado de extensión adquiere estructura fibrosa. Calentando a más de 100°C, se ablanda y sufre alteraciones permanentes. El caucho bruto adquiere gran deformación permanente debido a su naturaleza plástica. La plasticidad del caucho varía de una especie de árbol a otro y también depende de la cantidad de trabajo dado al caucho desde el estado de látex, de las bacterias que le acompañan e influyen en su oxidación y de otros factores. La plasticidad puede modificarse dentro de ciertos límites por la acción de productos químicos.

3. CONTROL DE CALIDAD: es un conjunto de actividades mediante las cuales se logra la aptitud para el uso. Es el proceso de regulación, a través del cual podemos comparar los servicios o productos con las normas y tomar medidas correctivas si es necesario.

4. DUREZA: es la resistencia que un artículo de caucho presenta a la penetración y nos indica una medida del acercamiento intermolecular, y es en la industria del caucho uno de los ensayos de laboratorio más comunes

5. ELONGACION: es una prueba de laboratorio de uso común en la industria del caucho. Da un valor de la resistencia límite del caucho vulcanizado y su elasticidad. Los resultados se expresan en porcentaje, que da una relación entre la longitud inicial de una muestra de caucho vulcanizado y su longitud al rompimiento; también se le llama módulo de elasticidad y proporciona una magnitud estrechamente relacionada con las fuerzas intermoleculares que tienden a ser más fuertes, cuanto más avanzada está la vulcanización.

6. ENVEJECIMIENTO: es el efecto negativo que sufre el caucho vulcanizado por la oxidación conforme transcurre el tiempo de exposición al oxígeno presente en el ambiente, que modifica las propiedades físicas y mecánicas del material. Por tanto, se efectúan pruebas de envejecimiento acelerado, para evaluar la estabilidad del caucho vulcanizado y poder garantizar que sus propiedades se mantendrán por un buen período de tiempo.

7. **ESPECIFICACIÓN:** es el requerimiento de ingeniería que permite juzgar la aceptabilidad de una característica en particular. Se selecciona de acuerdo con los requerimientos funcionales del producto o del cliente.

8. **OPTIMIZACIÓN:** es el efecto de lograr que una acción obtenga sus máximos beneficios manteniendo los métodos para lograrlo en una minimización constante.

9. **PARÁMETRO:** variable que, en una familia de elementos, sirve para identificar cada uno de ellos mediante su valor numérico.

10. **PROCESO:** significa cualquier combinación de máquinas, herramientas, métodos, materiales y personas, empleados para lograr productos o servicios de la calidad deseada.

11. **PRODUCTIVIDAD:** es el cociente entre el producto obtenido y los recursos utilizados por unidad de tiempo. Es hacer más con menos, es decir, cuando la productividad mejora, el valor de lo que se está fabricando crece más a prisa que el valor de los insumos que se están consumiendo.

12. **PROPIEDADES ELÁSTICAS:** son las propiedades mecánicas de un cuerpo que están relacionadas con su resistencia a fuerzas aplicadas tangencial y axialmente; un cuerpo con propiedades elásticas predominantes tiene baja resistencia a las fuerzas axiales y alta resistencia a las fuerzas tangenciales.

13. **PROPIEDADES PLÁSTICAS:** son las propiedades mecánicas predominantes en un cuerpo cuya resistencia es mayor a las fuerzas axiales, y menor cuando se aplica una fuerza tangencial.

14. **PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL:** son aquellas variables que se van a medir en un proceso, tales como temperatura, presión, humedad, tiempo, que son determinantes para lograr que un producto se elabore siempre con las mismas características.

15. **SCRAP:** es el nombre comúnmente empleado para la rebaba de hule que dejan los moldes en sus bordes finalizado el proceso de vulcanización, por la fuerza ejercida por las prensas hidráulicas que hacen fluir el caucho; su control es muy importante para reducir las mermas en el proceso.

16. **TEMPERATURA DE VULCANIZACIÓN:** es la temperatura máxima a la que se somete el compuesto crudo de caucho durante la vulcanización por un tiempo definido.

17. **TIEMPO DE VULCANIZACIÓN:** denominado también, tiempo de cura, es el lapso de tiempo en el cual se somete el compuesto crudo de caucho al proceso de vulcanización a una temperatura adecuada.

18. **TRACCIÓN:** es la capacidad que el material de las suelas tiene para lograr un buen agarre con el piso, y de esta manera evitar derrapes. Va

Intimamente ligada al diseño de la suela, pero ayuda también el tipo de material de la suela, ya que suelas elaboradas con materiales de muy baja granulometría tienden a tener menor tracción que las fabricadas con una granulometría más gruesa.

19. VULCANIZACIÓN: es la reacción química irreversible mediante la cual se incorporan átomos de azufre a la molécula del caucho a temperatura y tiempo convenientes; dicha reacción conlleva un cambio en las propiedades físicas, mecánicas y químicas del caucho, su tendencia es fortalecer las propiedades elásticas dando mayor resistencia a la fricción y dureza al caucho vulcanizado.

La temperatura y tiempo del proceso de vulcanización dependerán de varios factores como: tipo de fórmula, agente acelerante, propiedades que se requieren del producto, etc.

1.INTRODUCCIÓN

En la industria actual, debido a la gran competitividad en los mercados mundiales, existe la necesidad de obtener altas productividades, esto es, aumentar la producción, reducir costos y mantener los estándares de calidad exigidos por los clientes; si se conjugan adecuadamente las variables de proceso, puede lograrse lo anterior, es decir, se optimiza el proceso.

Se determina en esta investigación cuáles deben ser las condiciones óptimas para el proceso de vulcanización de un compuesto a base de hule o caucho natural, el cual estará destinado a ser materia prima en la industria del calzado para la fabricación de suelas, tacones, entresuelas, etc.

Las variables de proceso que se van a analizar son: tiempo de vulcanización, temperatura y presión de proceso y concentración de agente vulcanizante. Se determinan las propiedades fisicoquímicas del producto final por medio de pruebas de laboratorio; dichas propiedades son: envejecimiento acelerado, elongación, dureza, color y textura; esto permitirá establecer la aceptación del producto final en el mercado.

En la industria nacional donde se efectúa este estudio, el 90 % de la materia prima utilizada es caucho natural, por lo que, el tratar este tema específico proporcionará beneficios tangibles a la misma.

Para enfocar adecuadamente la parte del proceso que constituye el foco de la investigación, que es la vulcanización, se hace necesario describir la serie de transformaciones físicas y químicas que constituyen el proceso de fabricación de artículos de hule; posteriormente se enfoca la parte experimental que permitirá comprobar o no la hipótesis planteada.

Este estudio se dirige únicamente a la elaboración de productos a base de caucho natural, pero sus enfoques, análisis, resultados y conclusiones pueden proyectarse para determinar aspectos importantes en la elaboración de productos de otras clases de caucho, ya que las analogías existen entre ambos tipos de hule.

2. ANTECEDENTES

El estudio relacionado con la industria del hule es muy amplio; se encontró literatura en las publicaciones que efectúan casas productoras de materias primas para este tipo de industria, como manuales de compuestos químicos; esta literatura presenta un panorama muy general y amplio acerca de la industria del caucho. Su utilización será muy importante, ya que en este tipo de publicaciones se describen propiedades físicas, químicas y mecánicas del caucho vulcanizado con los compuestos químicos más comunes en este tipo de proceso, y es de mucha utilidad dicha consulta, ya que existen gráficas, tablas, ecuaciones y formulaciones de compuestos que permitirán comparar resultados obtenidos, con los que la teoría proporciona para cada tipo de producto, ya que este estudio se restringe a productos que van a ser utilizados en la industria del calzado, que se enmarca en una gran gama de productos de hule para muchos usos. (2), (3), (4) y (5).

Además, se encontró un estudio presentado en forma general sobre el tema, que fue presentado como trabajo de tesis por el Ing. Claudio Molina, y consiste en una descripción sobre el caucho natural, su tecnología y su situación nacional; trabajo que es considerado una fuente importante de información para esta investigación, aunque definitivamente este estudio es más específico acerca del tema de vulcanización de compuestos de hule natural, cuyo propósito fundamental será encontrar la conjugación más adecuada de las variables de proceso que permitan optimizar el mismo; por lo tanto, el presente trabajo no es meramente descriptivo, sino de investigación y experimental.

El caucho es un producto de una amplia gama de aplicaciones a nivel industrial, comercial, residencial, etc. Su utilización ha conllevado grandes beneficios a la humanidad; aquí se enfocarán específicamente compuestos de hule natural destinados a la industria del calzado, es decir, a la obtención de un producto intermedio, que servirá como materia prima a la industria de calzado, como por ejemplo: suelas, tacones, entresuelas, etc.

El caucho natural, como su nombre lo indica, se obtiene directamente de la naturaleza que lo brinda a través del exudado de una sustancia blanca, lechosa y poco viscosa de varias especies de árboles como el Hevea, Manihot, Landolphia, Dichopsis Gutta, etc.; el proceso posterior a la recolección determina diferentes tipos de caucho natural, como el crepé, la gutapercha, la hoja ahumada, etc.; es el primer tipo mencionado, de uso más frecuente en la industria que es objeto de estudio(6).

Toda industria tiene el propósito de lograr los máximos beneficios de tipo económico, cuando se trata de una industria lucrativa; en parte esto se logra incrementado la productividad del proceso, esto es, para mejorar los niveles o volúmenes de producción, reducir los costos de operación y mantener una calidad constante y satisfactoria del producto.

En la industria hulera, existe una serie de variables que deben controlarse y conjugarse perfectamente, bien para asegurar un proceso exitoso, pretender disminuir tiempos de vulcanización, y variar las concentraciones de los agentes vulcanizantes o acelerantes; no es una operación sencilla, puesto que pueden verse muy afectadas las propiedades físicas del producto final, y afectar por ende la calidad del mismo; de la misma forma, se presentan variaciones significativas al variar otras condiciones del proceso, como por ejemplo: temperatura de

vulcanización, presión de vulcanización, concentración de agente vulcanizante, concentración de agente acelerante, etc. es por ello que se hace necesario realizar un estudio experimental, sistemático y concienzudo del problema, el cual fue hallado en una industria hulera nacional privada de reciente apertura ubicada en la zona rural del municipio de Sumpango, Sacatepéquez y que se ha considerado un tema interesante para someterlo a estudio en esta tesis.

3. JUSTIFICACIONES

Este estudio involucra aspectos de gran importancia, específicamente para la industria nacional de hule, por cuanto a través del mismo podrán adquirirse elementos de juicio para aumentar la productividad en la fabricación de productos de hule para la industria del calzado, formulados a partir de caucho natural.

Otra justificación importante consiste en que el material tanto teórico como experimental reunido en este trabajo, puede servir de base a futuras investigaciones en esta rama de la industria, aunque con diferentes materiales de proceso o para la obtención de productos finales más especializados.

Por otra parte, se considera que a través de ésta investigación se podrá conocer o ampliar el conocimiento que se tenga sobre una rama tan poco explorada y sobre la que existen pocas fuentes de investigación a nivel nacional, como es la industria del caucho, y sobre todo aplicada a nuestra realidad nacional, con nuestras limitantes y con las materias primas disponibles en el país.

Específicamente, para la industria nacional privada en la cual efectuaré el trabajo de investigación, se justifica enormemente su ejecución, por cuanto proveerá a su cuerpo técnico de bases teórico-prácticas que les permitan formular los compuestos y regular las variables de proceso, de tal forma que se pueda optimizar la vulcanización de sus productos a base de hule natural, que son destinados a la industria del calzado; como son

los dos compuestos que en su calidad de nuevos se someterán a estudio en ésta tesis.

Lo anteriormente expuesto conllevó a que ésta industria brindase su apoyo, tanto material como humano para poder desarrollar este trabajo experimental, y que será una contribución para lograr superar los muchos obstáculos y problemas que se presentan en el proceso de vulcanización de compuestos a base de caucho natural.

A nivel general, se justifica la realización de éste trabajo por cuanto es un aporte que contribuirá al desarrollo de un proceso en una industria nacional, ya que las bases de ésta investigación se cimentan en nuestra realidad nacional, con el equipo, personal técnico y materia prima disponible en Guatemala.

4.OBJETIVOS

4.1. GENERALES:

- 4.1.1 Determinar las condiciones operacionales y de formulación que permitan un proceso de vulcanización óptimo para compuestos a base de hule natural, con el equipo y materiales disponibles en una industria hulera nacional privada.

4.2. ESPECIFICOS:

- 4.2.1 Evaluar el comportamiento de las propiedades físicas del producto final para asegurar una calidad satisfactoria y constante del mismo.
- 4.2.2 Evaluar y controlar el comportamiento de las condiciones del proceso de vulcanización de compuestos de hule natural.
- 4.2.3 Determinar la concentración óptima de agente vulcanizante; la temperatura y tiempo óptimos de vulcanización para dos distintos compuestos a base de caucho natural, que son destinados a la industria del calzado.

5. HIPÓTESIS

La producción global en la línea de vulcanización de los dos nuevos compuestos de hule natural destinados a la industria del calzado aumentará en más del 10%, al optimizarse las siguientes condiciones de proceso: tiempo de vulcanización y concentración de agente vulcanizante, si se trabaja a una temperatura de vulcanización constante de 140 °C.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. MATERIA PRIMA

6.1.1 CAUCHO O HULE NATURAL: el caucho es un material macromolecular, que a temperatura ambiental, se puede extender con poca presión por lo menos dos veces su tamaño original, y al soltar la presión, retornará aproximadamente a sus dimensiones y forma original. Como familia los cauchos, poseen cuatro características básicas:

- a) Elasticidad (torque axial).
- b) Flexibilidad (torque tangencial).
- c) Dureza.
- d) Impermeabilidad al aire y agua.

La unidad estructural de la molécula del caucho es el grupo orgánico C_5H_8 , que es capaz de fijar por adición dos grupos monovalentes.

Las propiedades físicas del caucho natural varían con la temperatura. A bajas temperaturas, se vuelve rígido y cuando se congela en estado de extensión adquiere estructura fibrosa. Cuando se calienta a más de $100^{\circ}C$, se ablanda y sufre alteraciones permanentes, tiene la propiedad de adquirir gran deformación permanente debido a su naturaleza plástica. La plasticidad depende del tipo de caucho (especie de árbol), del trabajo dado al caucho desde su estado de látex, de las bacterias que lo acompañan, etc. La plasticidad puede modificarse por la acción de productos químicos. Cuando el caucho natural ha sido estirado y deformado durante algún tiempo, no vuelve completamente a su estado original. Si se calienta,

entonces la recuperación es mayor que a la temperatura ordinaria; este fenómeno se llama deformación residual o estiramiento permanente y es propio del caucho.

La gravedad específica del caucho a 0°C es de 0.950; a 20°C es 0.934. Cuando el hule natural ha sido pasado por una calandria a 80°C, tiene una resistencia a la tracción de 15.0 kg/cm² y un alargamiento a la ruptura de 118% medido en la dirección de la fibra, y tiene una resistencia a la tracción de 2.9 kg/cm² y un alargamiento de 513% si se mide en dirección transversal. Al aumentar el tiempo de masticación, las propiedades medidas en dirección de la fibra tienden a acercarse a las medidas en dirección transversal.

El caucho reacciona con diversos compuestos químicos como los siguientes:

- Hidrógeno: se trata el caucho en hidrógeno a presión y temperatura elevadas, y se obtiene una sustancia cristalina y transparente no elástica.
- Halógenos: principalmente con el cloro, dicha reacción es acompañada por la formación de ácido clorhídrico; tiene muchas aplicaciones, el caucho clorado, en pinturas y barnices resistentes a los ácidos y los álcalis y en la fabricación de adhesivos.
- Oxidos de nitrógeno: se produce la degradación de la molécula del caucho y entran en ella el oxígeno y el nitrógeno. El caucho se vuelve blando, pegajoso y después resinoso; la luz es un catalizador de ésta reacción. A nivel industrial, se utilizan antioxidantes como la N-fenil-2-naftilamina para reducir la velocidad de la oxidación en el almacenaje del caucho.

La reacción química más importante del caucho es la llamada vulcanización, mediante la cual el caucho se combina con azufre; casi todos los objetos producidos de caucho a nivel industrial se utilizan en su forma vulcanizada. En la descripción del proceso, se detallará más respecto de esta reacción.

6.1.2 PRODUCTOS QUIMICOS AUXILIARES: son sustancias, principalmente orgánicas, que se emplean con el fin de efectuar o regular la vulcanización, facilitar la fabricación, mejorar la calidad y estabilidad del producto.

6.1.2.1 ANTIOXIDANTES Y ESTABILIZADORES: son sustancias que retardan el deterioro del caucho, ya sea crudo o vulcanizado, que es causado por la oxidación. Los efectos provocados por el oxígeno al caucho son, entre otros: endurecimiento, pérdida de elasticidad y flexibilidad.

Pueden clasificarse químicamente en 2 grupos: a) aminas y sus derivados y b) fenoles y sus derivados; tanto la energía como antioxidantes es aproximadamente la misma para cada grupo, pero en su actividad existen diferencias esenciales en presencia de negro de carbón, y también las hay en el grado de color que comunican a los vulcanizados por exposición a la luz. Los antioxidantes efectúan su labor como interruptores de cadena, agentes de transferencia y destructores de peróxidos. Se recomienda utilizar antioxidantes fenólicos en compuestos de caucho blancos o de colores claros, mientras que los

amínicos son más efectivos para compuestos oscuros o que incluyan negro de carbón.

Los antioxidantes más utilizados de cada clase son:

a) Fenólicos:

- 2,6-di-ter-butil-para-cresol.
- 4-metil-6-ter-butilfenol.
- 1,5-dihidroxi-naftaleno.

b) Amínicos:

- Difenilaminas alquiladas.
- Difenilaminas arilalquiladas.

6.1.2.2 ACELERANTES DE LA VULCANIZACIÓN

Son sustancias que, añadidas en cantidades pequeñas a la mezcla o compuesto vulcanizable, aumentan considerablemente la rapidez de la vulcanización. Además, mejoran notablemente la calidad del producto. Antiguamente se utilizaban compuestos inorgánicos básicos como acelerantes: blanco de plomo, litagirio, cal y magnesia; éstos han sido sustituidos por los acelerantes orgánicos; el primero que se utilizó fue la anilina, pero por su alta toxicidad, se prefirió la utilización de sus derivados y la tiocarbanilida, producto de la reacción de la anilina con el sulfuro de carbono, que fue utilizada por muchos años. Se han utilizado otros químicos como la N-N'-dimetil-para-fenilenodiamina, el 2-mercaptobenzotiazol y los sulfuros de tiuram. Se pueden entonces, clasificar, los acelerantes en cuatro grupos químicos:

a) Mercaptotiazoles y derivados.

- b) Ditiocarbamatos y sulfuros de bis(sulfuros de tiuram).
- c) Guanidinas.
- d) Productos de reacción de aldehídos y aminas.

Las especificaciones para los acelerantes han sido establecidas por los fabricantes y son comprobadas por medio de ensayos de fusión, finura, color, olor, solubilidad, cenizas, pérdidas por calentamiento, viscosidad y peso específico. La mayoría de los fabricantes proporcionan instrucciones detalladas para la utilización de estos productos en pruebas, previo a la utilización en una línea de producción.

En la industria, objeto de este estudio, se utilizan 3 acelerantes en los procesos con hule natural, y son:

- a) DPG®(Nombre comercial "Monsanto Chemical")

Difenilguanidina(nombre químico)

Es un acelerante secundario para hules naturales con sulfenamida y tiazol como acelerantes primarios. Punto de fusión 146°C, gravedad específica 1.2, Es un polvo blanco, aceitoso, y que no forma polveo, y es soluble en acetona, etanol y tolueno e insoluble en gasolina y agua.

- b) SANTOCURE®(Nombre comercial "Monsanto Chemicals")

N-ciclohexil-2-benzotiazolsulfinamida(nombre químico)

Acelerante de cura rápida para todo tipo de elastómeros vulcanizables con azufre. Punto de fusión 96°C, gravedad

RECIBIDO

GUATEMALA

específica 1.3. Es un polvo blanco soluble en acetona y éter etílico; moderadamente soluble en alcohol e insoluble en agua.

c) THIURAD® (Nombre comercial "Monsanto Chemicals")

Disulfuro de tetrametiltiouram (nombre químico)

Acelerante secundario rápido en combinación con el acelerante SANTOCURE®. Punto de fusión 142°C, gravedad específica 1.4. Es un polvo blanco soluble en acetona, parcialmente soluble en etanol e insoluble en agua y éter de petróleo(ref. 2).

Algunas propiedades importantes que los acelerantes deben poseer son las siguientes:

- Fácil dispersión en el caucho.(solubilidad)
- Granulometría adecuada (evitar pérdidas por polveo y efectos tóxicos a los trabajadores).
- Estable en almacenamiento
- No teñir.
- Ser inodoro.
- Insípido.
- No tóxico.
- No irritante a la piel.

Es importante para elegir un acelerante conocer las propiedades finales del producto, para saber si el químico se adapta a los requerimientos del proceso; debe tomarse en cuenta también, en la elección, el tiempo de vulcanización, los efectos del material en la calidad del producto y la economía en la producción.

Las operaciones de elaboración se ven muy afectadas con el fenómeno de la pre-vulcanización, mediante la cual ocurre una vulcanización incipiente en cualquier etapa previa a la vulcanización final; esto suele suceder en el laminado de los compuestos donde la temperatura se eleva y si el acelerante o su dosificación no es la indicada se forman ondulaciones y protuberancias duras en el material, lo que no permite su manufactura y afecta la calidad final del producto.

6.1.2.3 ANTIOZONANTES

El ozono produce un rápido deterioro y agrietamiento del caucho cuando entran en contacto. Por eso se necesitan sustancias que retarden este deterioro, ya que ningún químico conocido da protección indefinida. Los antiozonantes más efectivos se clasifican dentro de los siguientes grupos:

- a) Diaminas simétricas
- b) Diaminas no simétricas.
- c) Grupo vario (dihidroquilinas y sales metálicas de ditio-carbamatos).

En la industria hulera, objeto de estudio, se utilizan los siguientes antiozonantes:

- a) SANTOFLEX AW® (Nombre comercial Monsanto Chemicals)
6-etoxi-1,2,-dihidro-2,2,4-trimetilquinolina (nombre químico)
Antiozonante de actividad moderada a bajo costo. Es un líquido viscoso oscuro, de gravedad específica 1.04, soluble en tolueno y etanol.

b) SANTOFLEX IP® (Nombre comercial Monsanto Chemicals)

N-isopropil-N'-fenil-parafenilendiamina (nombre químico)

Antiozonante/antioxidante de alta actividad. Hojuelas de color café oscuro, punto de fusión 74°C, gravedad específica 1.1; soluble en alcohol y acetona. Ligeramente soluble en gasolina.

6.1.2.4 ACTIVADORES DE VULCANIZACION

Son sustancias que se emplean en combinación con un acelerante, para aumentar la velocidad de vulcanización que se obtendría con el acelerante solo y resulta más económico que aumentar la concentración de acelerante.

Los químicos que más comúnmente se emplean como activadores son: las alquilaminas como el 2-aminoetanol, la dietanolamina, trietanolamina, di-n-butilamina, dibencilamina y tetrametilenopentamina.

Los activadores más empleados en la industria son los ácidos grasos varios, pero especialmente el ácido esteárico. Suelen emplearse también, pero en menor grado, los óxidos metálicos; el principal es el óxido de zinc.

6.1.2.5 PLASTIFICANTES

Son sustancias que aceleran la reducción de la viscosidad del caucho durante la masticación. Se emplea debido a que el caucho natural es muy viscoso y requiere reblandecerlo, a fin de poder incorporarle cargas, acelerantes, activadores y todos los químicos auxiliares requeridos en el proceso.

Los químicos más frecuentemente usados como plastificantes son los mercaptanos y los compuestos de azufre capaces de formar mercaptanos.

Las características principales de los plastificantes deben ser:

- No afectar la velocidad de vulcanización.
- Ser inodoros.
- Ser incoloros y no teñir.
- No tóxicos.

Algunos ejemplos de plastificantes son:

- El disulfuro de bis(orto-benzamido-fenilo)
- El 2-naftalenotiol.

6.1.2.6 AGENTES VULCANIZANTES

El agente vulcanizante más utilizado y el más importante en esta industria es el azufre, el cual se adiciona comúnmente en su forma elemental, como polvo fino color amarillo verdoso con una gravedad específica de 2.0.

Existen también combinaciones orgánicas sulfurosas capaces de liberar azufre a las temperaturas de vulcanización. Los principales miembros en esta clasificación son: el sulfuro de bis(dimetiltiocarbamilo), el tetrasulfuro de dipentametileno, sulfuros de alquifenoles y la 4,4,ditiodimofolina(sulfasán 4 ©).

Existen agentes vulcanizantes que no contienen azufre, por ejemplo: trinitrobenceno, peróxido de benzoilo y peróxido de zinc, pero no tienen aplicación para el caucho natural.

El principal requisito de un agente vulcanizante es que efectúe la vulcanización, después de ser expuesto a temperatura conveniente durante cierto tiempo; además debe ser soluble en el caucho o estar dividido en partículas finas para que pueda dispersarse con facilidad y uniformidad en el caucho preferiblemente debe no tefir y ser no tóxico.

6.1.2.7 RETARDADORES

Son agentes que deben reprimir el comienzo de la vulcanización a las temperaturas de elaboración, pero no retardan o incluso activan el curado a las temperaturas de vulcanización. La elección del retardador depende del acelerante empleado y su actividad, que por ser difícil de predecir, debe evaluarse mediante ensayos. Los retardadores más aceptados son: anhídrido ftálico, ácido benzoico y ácido salicílico. En la industria hulera objeto de estudio, se utiliza el siguiente producto:

SANTOGARD® (Nombre Comercial Monsanto Chemicals)

N-(ciclohexiltio)-ftalamida (Nombre químico)

Es un inhibidor de prevulcanización, en forma de cristales blancos, punto de fusión 91°C, gravedad específica 1.3, soluble en acetona, alcohol y tolueno. Es muy activo con una gran variedad de aceleradores y de sistemas de cura por azufre. Incrementa satisfactoriamente el margen de seguridad del inicio de la prevulcanización, sin menoscabar otras propiedades del proceso.

Un buen retardador debe poderse dispersar fácilmente en el caucho y ser soluble en él, además, conviene que no sea tóxico, no debe teñir, debe ser inodoro y estable en almacenamiento.

6.1.2.8 CARGAS

Existen dos tipos de cargas en un compuesto de caucho:

- Cargas reforzantes: estas sustancias mejoran diversas propiedades físicas de las mezclas, tal como la resistencia a la rotura, al desgarró o a la abrasión. De éstos el más importante es el negro de carbón que se utiliza como colorante y le imparte dureza al producto; además, se tienen el óxido de zinc, el caolín y el carbonato de magnesio.

- Cargas inertes: son sustancias que se pueden incorporar a las mezclas sin rebajar demasiado sus propiedades mecánicas y permiten bajar los costos de fabricación. Le dan cuerpo, peso y dureza al producto. Entre estas sustancias están el calcio, el sulfato de barita y el talco.

6.1.2.9 PIGMENTOS

Son sustancias que le dan la coloración deseada al producto. Los más empleados son: el óxido de hierro, sulfuro de cadmio, sulfuro de antimonio, óxido de zinc y el dióxido de titanio.

6.2. EQUIPO:

6.2.1 MALAXADOR INTERNO(BANBURY):

Este equipo está constituido por dos cilindros de dentado helicoidal que giran en sentido contrario convergente en una

cámara cerrada mediante la acción de un pistón hidráulico. Su diseño permite trabajar a grandes velocidades (20 a 45 RPM) y con elevadas temperaturas (80-90°C), pues la operación dura pocos minutos. La cámara cerrada permite utilizar el banbury para la primera etapa de mezcla de los compuestos, ya que se evita el polveo de los químicos añadidos.

Debido a la generación de calor por el trabajo realizado sobre el material, se hace necesario un sistema de enfriamiento, el cual se realiza con agua que circula en una carcasa en la cámara interna del banbury.

6.2.2. MALAXADOR CILINDRICO(MOLINO ABIERTO)

Este aparato se compone esencialmente de dos cilindros paralelos que giran en sentidos inversos convergentes con velocidades diferentes, y la velocidad del cilindro delantero es menor que la del cilindro de la parte de atrás. Los cilindros son movidos por un motor eléctrico de 125 HP, y son los cilindros de 22x60 pulgadas.

Su función consiste en plastificar mecánicamente el caucho a través de pasar repetidas veces los trozos de caucho, de manera que por medio de la fricción producida por su paso entre los cilindros se vaya suavizando, hasta convertirse en una tira blanda y plástica que sigue en rotación pegada sobre el cilindro delantero. Este trabajo va acompañado de desprendimiento de calor, que hace necesario el empleo de agua para reducir la temperatura y evitar prevulcanización, la

cual circula a través de los conductos internos que tienen los cilindros del molino.

6.2.3. CALANDRIA

Es un aparato utilizado para darle un espesor o perfil constante a una lamina de caucho plastificado. Consiste en tres cilindros arreglados en forma vertical, son los cilindros superior e inferior móviles y el central fijo, los que permiten calibrar el espesor necesario para la lámina. Para conseguir el espesor de la hoja, se necesitan dos tiempos: la hoja que sale del primer par de cilindros (central y superior) es recogida por el segundo par de cilindros (central e inferior) y es la separación de éstos cilindros la que dará el calibre deseado al compuesto.

La calandria debe permitir obtener tiras de material con espesor y ancho constante, por lo que sus cilindros deben guardar paralelismo. Además, es importante el control de temperatura para evitar prevulcanización; dicho control se mantiene con circulación de agua en la parte interna de los cilindros de la calandria.

6.2.4. TROQUELES

Su función es cortar el material del tamaño más próximo posible al del tamaño del producto final; esto es con el propósito de que cuando el material fluya en la etapa de vulcanización llene perfectamente todos los resquicios de los moldes, y a la vez no haya demasiado desperdicio en la manufactura.

El troquelado se hace por medio de punzones de diferentes tamaños, de acuerdo con el producto que se va a elaborar; en el caso de suelas, existen punzones para los diferentes números de calzado. La lámina de compuesto es llevada por una banda transportadora hasta los troqueles que van cortando el material por la presión ejercida sobre él.

6.2.5 PRENSAS HIDRÁULICAS

Es el equipo mediante el cual se realiza el proceso de la vulcanización del material; consiste en dos o tres platinas por las cuales circula aceite térmico a la temperatura de vulcanización, y las que al cerrarse producen una elevada presión (1200 PSIA), que fuerza al compuesto a fluir y llenar por completo los moldes. Los moldes metálicos se colocan en las platinas, y en su interior se coloca la pieza de material que va a ser vulcanizado. Si dicha pieza es demasiado grande, se tendrán elevados desperdicios (scrap), y si es muy pequeña, se obtendrá un producto final incompleto con agujeros o cortado; aquí radica la importancia de la etapa de troquelado. Es muy importante en estos equipos el control de tiempos y temperaturas para obtener la vulcanización adecuada del producto. El aceite térmico que regularmente se emplea a 140°C, circula a través de una tubería revestida que lo transporta de la caldera a las prensas en un circuito cerrado.

6.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

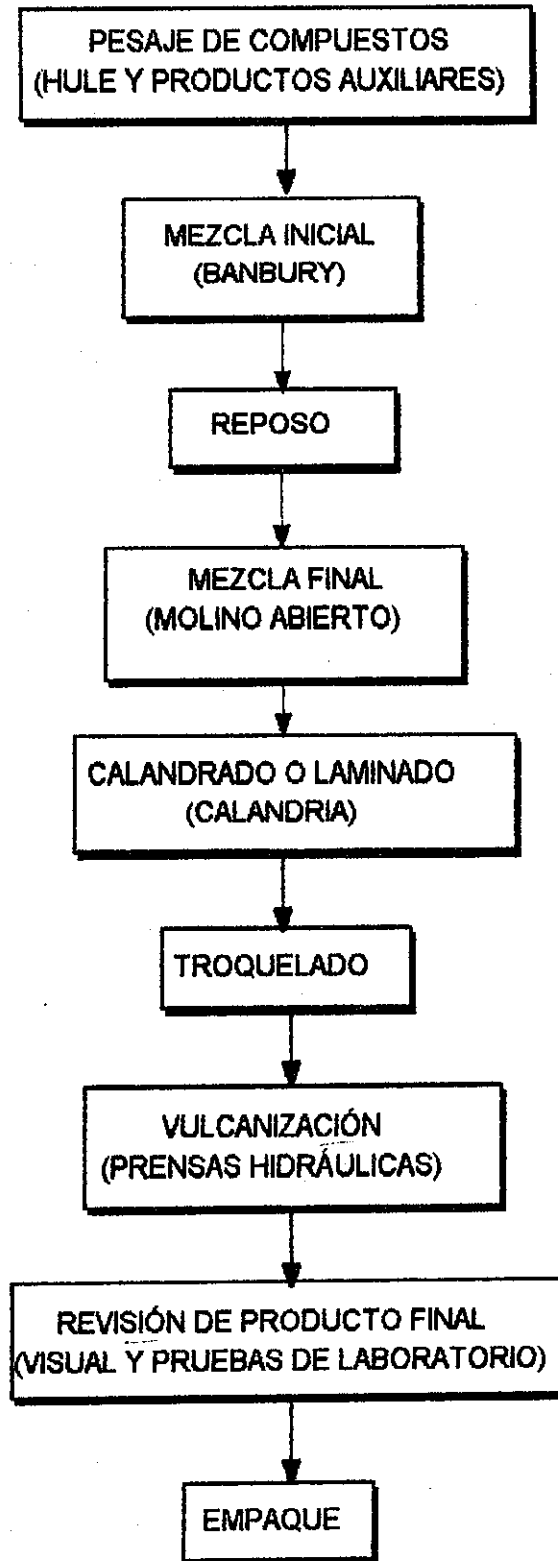
El proceso de fabricación de un compuesto de caucho natural, específicamente el de suelas para fabricación de calzado consta de los pasos que aparecen en el diagrama de bloques de la siguiente página; se describe a continuación cada una de las etapas de éste proceso y se menciona las principales variables del mismo; posteriormente en la sección de Metodología, se menciona la manera en que estas variables se modificaron para la realización de la fase experimental de esta investigación; es conveniente mencionar que todas las corridas experimentales efectuadas pasaron por cada una de las etapas del proceso que se describe a continuación, aunque se efectuaron dichas corridas con compuestos de un tamaño de lote del 10% del tamaño normal de un batch por el carácter experimental que asumían las fórmulas empleadas.

6.3.1. PESAJE DE COMPUESTOS Y QUÍMICOS AUXILIARES

El pesaje de los compuestos necesarios para la fabricación del producto se divide en dos secciones específicas:

a) Pesaje Micro: este pesaje se efectúa en una balanza de precisión y debe efectuarlo un operario muy bien capacitado para tal efecto; es muy importante la exactitud del pesaje micro debido a que aquí se pesan los acelerantes, vulcanizantes, colorantes, antioxidantes y todos los químicos que se encuentran detallados en cantidades en gramos en la máster fórmula del compuesto. Cada uno de los componentes pesados debe enviarse por separado y debidamente identificado al

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO



departamento de molinos para su utilización; la identificación debe contener específicamente la siguiente información:

- Nombre del químico.
- Cantidad pesada.
- Número de la fórmula en uso.
- Nombre del producto final correspondiente al No. de fórmula.

Resulta conveniente la utilización de un área cerrada y algo alejada del proceso para el pesaje micro con el propósito de reducir vibraciones que puedan afectar las balanzas; además, así se evita el polveo de los químicos hacia la planta o contaminación de la planta hacia los productos químicos. Es recomendable que el operario encargado de esta sección utilice guantes de hule, gabacha y mascarilla para minimizar los riesgos de contaminación, ya que la mayoría de los productos utilizados irritan las vías respiratorias.

b) Pesaje macro: esta etapa se efectúa con el auxilio de una báscula de mayor capacidad, ya que aquí se pesan los compuestos con mayor peso en la fórmula, es decir, hule, cargas, plastificantes, etc. Regularmente esta fase debe ubicarse físicamente tan cerca como sea posible del banbury o mezclador interno para facilitar el transporte, identificación y posterior carga a esta máquina. Es importante en esta etapa, que el tamaño de los trozos de hule estén en un rango de 4 a 5 kg., lo cual facilitará su transporte al banbury (el cual se encuentra elevado), y además favorecerá una correcta plastificación e incorporación de todos los químicos auxiliares; fragmentos muy pequeños de hule tampoco son recomendables por cuanto la

plastificación se dificulta y hay tendencia a la formación de protuberancias en el producto final.

Resulta muy importante que los encargados de la sección de pesaje lleven un control del número de pesadas, el número de fórmula utilizada y la identificación correcta de los compuestos; esto es para efectos de control de producción, control de inventarios y para evitar confusiones al operador del banbury.

6.3.2. MEZCLA INICIAL (BANBURY)

En este mezclador interno, se agregan al caucho todos aquellos químicos auxiliares que tienden a perderse muy fácilmente por polveo, el cual se evita por el hecho de ser un mezclador cerrado por un pistón neumático. Al conseguirse una masa blanda y algo plástica, se agregan los ingredientes en el orden siguiente:

- 1o. Plastificantes.
- 2o. Cargas.
- 3o. Antioxidantes
- 4o. Colorantes.

Los ingredientes restantes (acelerantes y vulcanizantes) es recomendable agregarlos en los molinos abiertos; esto es con el fin de evitar prevulcanizaciones indeseables, que se dan a consecuencia de las altas temperaturas a que opera el banbury (alrededor de 80°C), para no pasar el compuesto con estos ingredientes por dos mezcladores (interno y de cilindros), y para evitar variaciones en la vulcanización que puedan deberse a pequeñas cantidades de acelerante que puedan perderse en el banbury, lo que no ocurre en los mezcladores de cilindros.

La operación del banbury se puede resumir en tres etapas:

- a) Incorporación del caucho y plastificantes; cerrar el pistón neumático y mezclar aproximadamente 2 min.
- b) Subir pistón neumático y agregar antioxidantes, retardadores, cargas y pigmentos, cerrar y mezclar aproximadamente 3 min.
- c) Descargar la masa y reposar por aproximadamente 24 hrs.

6.3.3. REPOSO

En ésta etapa del proceso, se pretende dejar reposar el compuesto luego de salir del banbury, con el propósito de que su temperatura interna baje para evitar prevulcanizaciones y para que los químicos recién homogeneizados y dispersados en el caucho plastificado se estabilicen, previo a la etapa siguiente del proceso.

Este reposo se puede efectuar colocando los trozos de compuesto en carros de metal en un lugar aireado de la planta por un lapso de 24 hrs., aproximadamente; es necesario tener precaución para prevenir contaminación por polvo.

El tiempo de reposo no es estrictamente necesario de 24 horas, este puede tener variaciones, que dependen de la temperatura del lugar donde se ubica la planta; para climas templados, el reposo puede ser menor, pero en climas cálidos deberá acercarse más a las 24 hrs.

6.3.4. MEZCLA FINAL (MALAXADORES DE CILINDROS)

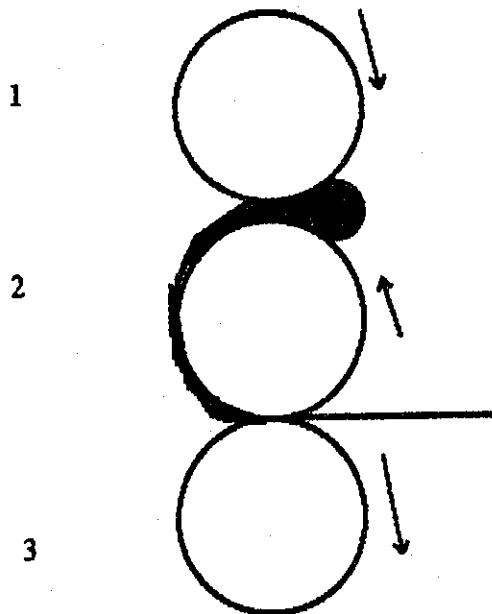
Al finalizar la etapa de reposo, se agrega la mezcla a los malaxadores cilíndricos donde se les agrega los acelerantes y el azufre, los cuales se incorporarán rápidamente debido a la acción

envolvente del malaxador, el cual deberá contar con la circulación adecuada de agua fría para evitar prevulcanización. Esta etapa deberá durar aproximadamente 5 min. o menos, pues tiempos mayores presentan riesgo de prevulcanización. Al concluir este tiempo, se debe extraer el material en forma de tiras, las cuales deben airearse o sumergirse brevemente en agua, pero no apertarse tira sobre tira; esto es con el propósito de hacer descender rápidamente la temperatura y evitar vulcanización previa.

Es muy importante que los operadores de los malaxadores sean personas experimentadas en esta actividad, ya que es sumamente peligrosa por cuanto la velocidad de los cilindros provoca envolvimiento, el que puede arrastrar la mano del operador con el consiguiente riesgo de amputación; el operador del malaxador deberá contar por lo menos con un ayudante para realizar las labores de enfriamiento rápido del material, por cuanto alguna distracción del operador en este sentido puede provocar prevulcanizaciones en el material que se está trabajando. Además de guantes de cuero, el operador deberá contar con una cuchilla muy filosa que le permita ir cortando el material y formando cilindros, que se depositarán repetidamente entre los cilindros, hasta que la plastificación se haya alcanzado (aprox. 4 min.), y luego deberá ir cortando las tiras, extraerlas y entregarlas al ayudante. Deberá tener identificadas las cantidades pesadas de azufre y acelerante correspondiente a la fórmula que está trabajando, para evitar confusiones indeseables.

6.3.5. CALANDRADO O LAMINADO

En esta etapa del proceso, se persigue obtener una lámina de material de espesor controlado. Esto se hace por medio del paso del material plastificado a través de los cilindros arreglados en posición vertical, que conforman la calandria. Esto permitirá obtener material de grosor específico, lo que facilitará controlar desperdicios en la etapa de vulcanización, pues la repetibilidad del parámetro proporcionará llenados exactos de los moldes de vulcanización. Es importante el control de la temperatura, aunque los dos pasos que realiza el compuesto a través de la calandria reduce el tiempo de exposición a la fricción, lo que reduce el riesgo de una prevulcanización. A continuación, se presenta el arreglo más común de una calandria, en vista de perfil:



Como podrá observarse en la figura anterior, el compuesto ingresa a la calandria a través de los cilindros 1 y 2 que giran en sentido contrario y convergente; el compuesto es arrastrado y permanece adherido al

cilindro 2 y luego es forzado a pasar a través de la abertura entre los cilindros 2 y 3 que es donde se tiene la calibración correspondiente al grosor que se persigue obtener en el material. A través de los cilindros, debe circular agua de enfriamiento.

6.3.6. TROQUELADO

En esta etapa, tal como se mencionó anteriormente, se persigue cortar el material plastificado de un tamaño tal que permita el llenado de los moldes de vulcanización de la forma mas exacta posible, esto es, sin excesos de desperdicios en forma de rebaba que representa aumento en los costos de producción y sin problemas de escasez de producto en el molde, lo cual provoca problemas de calidad en el producto final, y es razón de rechazo y por ende afecta en el costo de la planta.

El proceso se realiza en una banda en la cual se colocan las tiras de material del grosor requerido(calandradas), y luego por la acción de un motor un troquel volumétrico corta el trozo de material. El troquel puede ser de diferentes tamaños de acuerdo con el número de suela que se va a fabricar. Las piezas obtenidas se destinan al departamento de prensas, bien identificadas, para que el operador que trabaja determinado número de suela en su prensa, sepa cuál material le corresponde utilizar; la identificación debe llevar la siguiente información:

- No. de suela.
- Nombre o tipo de suelas.
- Color de suela
- No. de prensa donde se ubica el molde correspondiente.

6.3.7. VULCANIZACION

La vulcanización es el proceso químico mediante el cual se incorporan átomos de azufre a la molécula del caucho a temperatura y tiempo controlados; ésta reacción es la que permite darle las propiedades físicas y mecánicas definitivas al producto; es importante señalar que además del azufre se incorporan a la molécula del caucho, también acelerantes, los cuales mejoran las propiedades del producto y reducen el tiempo de cura o cocimiento.

Para el caso específico de la fabricación de suelas; una vez se tienen troqueladas las piezas correspondientes al tamaño de la suela, estas piezas se colocan en el molde, acción más conocida como "cargar el molde", se cierra, se coloca entre las platinas de la prensa y se acciona el sistema hidráulico de las mismas, y mediante un control automático se fija el tiempo de cocción a la temperatura que opera la caldera de aceite térmico. La mayoría de las fórmulas utilizadas comúnmente tienen establecida su relación tiempo-temperatura óptima, pero dado el caso de tener una fórmula modificada, se tiene la posibilidad de establecer esta relación óptima de manera experimental, y se utiliza también la variable concentración de vulcanizante, a fin de optimizar el proceso de producción de suelas negras o translúcidas.

Previo a la vulcanización, el material presenta propiedades elásticas que predominan sobre las propiedades plásticas, sobre todo a la salida de los malaxadores cilíndricos; después de vulcanizado,

predominan las propiedades plásticas sobre las elásticas, lo que le da las características mecánicas de tracción, resistencia a la fricción y dureza que necesita una suela para calzado. Algunas de estas propiedades se ven incrementadas con el uso de grabados en el producto, sobre todo los antiderrapantes que se imprimen directamente en el proceso de vulcanización con el grabado que poseen los moldes metálicos.

La variable de proceso temperatura de vulcanización no se vio modificada en el presente estudio, debido a que los productos elaborados por esta planta se vulcanizan a 140°C, por lo que se encontró más factibilidad en variar únicamente tiempos de cura y concentración de vulcanizante.

Cuando el tiempo de cura ha finalizado, el operador abre el molde y extrae la suela, la cual deberá tener un sobrante mínimo para evitar mermas de proceso por scrap, ya que este hule vulcanizado no puede reprocesarse, al menos en esta planta. Previo a cargar nuevamente el molde, el operador deberá colocar silicona en el molde como lubricante para que el material vulcanizado no se pegue en el mismo, y fluya con facilidad llenando todos los intersticios del molde por muy elaborado que sea su diseño. Las suelas deben dejarse enfriar por 20 min. y luego pueden pasar al departamento de empaque para su revisión final y embalaje.

6.3.8. REVISIÓN DE PRODUCTO FINAL

En esta etapa del proceso, debe revisarse minuciosamente el producto vulcanizado para asegurarse que el mismo cumple con los estándares de calidad establecidos. Por no contar con un laboratorio completo en esta planta, se efectúan pruebas de dureza, elongación y análisis visual que incluye, textura, color y forma, las mismas las efectúa un supervisor de control de calidad a muestreos aleatorios que realiza en los departamentos de prensas y empaque.

La prueba de dureza se efectúa con la ayuda de un aparato conocido como durómetro, y que consiste en un pin conectado a un dial que posee una escala en grados Shore A. Se coloca el pin directamente sobre la superficie del material, y se suelta un seguro para que se ejerza una presión constante de 500 g. sobre el material; esto hará que la aguja señale en el dial la dureza correspondiente del material. Los resultados de dureza dan una indicación de la resistencia del caucho a la penetración de un cuerpo sólido, y están íntimamente ligados al estado de la superficie del material y a sus propiedades intrínsecas que han sido definidas primordialmente en la etapa de vulcanización. La dureza se toma entonces como un indicador del estado de la estructura del compuesto; regularmente, bajas durezas indican vulcanizaciones incompletas o material muy elástico, y durezas altas indican vulcanizaciones muy sobradas (recocida) o compuesto muy plástico.

La evaluación de la elongación consiste en una medición de la resistencia límite del caucho vulcanizado y su elasticidad. Para

realizar esta prueba, se coloca fijamente una pieza del material entre dos mordazas; una es conectada a un dinamómetro (con el fin de medir la fuerza) y la otra es estirada por un motor y tornillo sin fin a velocidad constante; en una escala se va midiendo el alargamiento obtenido y la fuerza empleada. En este estudio, se tomó para el análisis experimental el valor de la elongación o estiramiento a la rotura, entendiéndose por el % respecto al largo inicial de la pieza que ésta había aumentado en el momento de la rotura, al cual se le denominó simplemente % de elongación. Cabe señalar que una prueba como la anterior no da una idea de la duración del producto final, ya que una suela, raramente será sometida a un esfuerzo de alargamiento, pero sí indica la calidad de vulcanización, porque nos permite tener una relación entre las propiedades plásticas y elásticas.

Las pruebas de evaluación visual consisten analizar sensorialmente tres aspectos del producto: color, forma y textura. Dicha evaluación se hace contra patrones o estándares fijados por simple comparación, y se utiliza una escala que va de deficiente a muy bueno, pasando por regular y bueno. En color, debe observarse la tonalidad que el producto final adquiere, su brillantez y la ausencia de manchas, sobre todo en las suelas de colores claros.

La forma indica cómo la suela terminada se compara con el patrón en el que se verifica, llenado de molde (ausencia de agujeros o cortes), la forma plana de la suela, y que su peso y grosor estén entre estándares. En la prueba de textura, se evalúa la calidad de la superficie del producto, ausencia de gránulos, agujeros o cortes, ausencia de

rugosidad, pues se pretende tener una superficie lisa y de buena presentación.

Las pruebas de envejecimiento son las mismas correspondientes a la evaluación visual, pero se efectúan a muestras vulcanizadas sometidas a calentamiento de 70°C durante 8 semanas, con el fin de evaluar la alteración debida a la oxidación que puedan sufrir las propiedades mecánicas del caucho vulcanizado, y de esta forma evaluar la duración de las suelas.

Cuando el producto cumple con los requisitos de calidad, se debe empacar en bolsas de polietileno o cajas de cartón en cantidades que el cliente solicite, pero siempre teniendo cuidado de empacar pares, pie izquierdo y pie derecho, para evitar reclamos por suelas solas.

7. FASE EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN

7.1. MATERIALES

Como se indicara en la sección de antecedentes de este trabajo de investigación, éste se realizó en una industria hulera nacional privada, de la cual se omite el nombre a petición de sus directivos. Esta industria hulera ha facilitado al autor de este trabajo de los materiales, equipo y recurso humano para la realización de las pruebas experimentales programadas en este estudio.

7.1.1. Materia prima para la elaboración de productos de caucho natural:

- 7.1.1.1 Hule o caucho natural
- 7.1.1.2 Oxido de zinc
- 7.1.1.3 Azufre
- 7.1.1.4 Ácido esteárico
- 7.1.1.5 Dioxido de titanio
- 7.1.1.6 Cargas (reforzantes e inertes)
- 7.1.1.7 Colorantes
- 7.1.1.8 Plastificantes
- 7.1.1.9 Acelerantes
- 7.1.1.10 Otros.

7.2. EQUIPO:

- 7.2.1 Balanza digital marca Mettler. (capacidad 240 g)
- 7.2.2 Balanza analógica marca Toledo. (capacidad 200 kg)

- 7.2.3. Molino cerrado Banbury: Tamaño 3A, capacidad de 45 a 65 Kg. por lote, motor de 250 hp, gasto mínimo de enfriamiento de 280 litros de agua por minuto.
- 7.2.4 Molino abierto de cilindros (malaxador cilíndrico): Tamaño de cilindro de 22 x 60 pulgadas, con capacidad de 35 a 60 kg. por lote y con motor de 125 hp.
- 7.2.5 Calandria: De 3 cilindros de 32 x 48 pulgadas con motor de 40 hp.
- 7.2.6 Prensas hidráulicas: marca Marzola, operando a 1200 PSIA mínimo y con aceite térmico como medio calefactor.
- 7.2.7 Durómetro: escala de 0-100 °Shore-A, montado sobre base universal con una masa superior de 500 g.
- 7.2.8 Dinamómetro: acoplado a un motor y tornillo sin fin, para la evaluación de la tracción y/o módulo de elasticidad de las muestras.
- 7.2.9 Horno: con circulación de aire caliente en un rango de temperatura de 30 a 90 °C y capacidad de 3 pies cúbicos.
- 7.2.10 Termómetros: de carátula analógica con rango de 0 a 180 °C y de mercurio con rango de 0 a 120 °C.
- 7.2.11 Moldes metálicos: para la fabricación de las suelas de caucho natural.

7.3. METODOLOGÍA:

Para la obtención de los datos experimentales, se partirá de fórmulas patrón o estándar sobre las que se hará variaciones que permitirán obtener los datos necesarios para la optimización del proceso.

7.3.1. Método Experimental

Se utiliza para los dos tipos de compuestos objeto de estudio, es decir Fórmula A (suelas negras) y Fórmula B (suelas traslúcidas). Para una temperatura de vulcanización constante de 140°C., para 6 tiempos de vulcanización (t) comprendidos en el rango (5.0 a 7.5 min.), se efectuaron corridas experimentales variando la concentración de agente vulcanizante (azufre), en un rango de (0.50 a 0.80% w/w), para obtener datos de dureza (°Shore A), elongación (%), evaluación visual actual y luego de envejecimiento acelerado; para cada una de las muestras obtenidas.

7.3.2. Procedimiento experimental

Se aplica el mismo procedimiento a las dos fórmulas sujetas a estudio.

- a) Tomar una cantidad de 160 g \pm 3% del compuesto fórmula A1 con una [S]=0.50% colocarla en el molde para suelas, cargar de igual manera 5 moldes más, vulcanizar a temperatura T=140°C por espacio de 5 min.
- b) Proceder igual que en el inciso a), pero efectuando la vulcanización por 5.5 min., 6.0 min., 6.5 min., 7.0 min. y 7.5 min.
- c) Proceder de igual forma que en los incisos a) y b), pero con muestras del compuesto fórmula A2, A3 y A4. En la sección de anexos del presente estudio, se encuentran las fórmulas patrón A y B y sus correspondientes variaciones A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3 Y B4.

d) Determinar a todas las muestras obtenidas la dureza en °Shore A y la elongación en %, tabular los datos experimentales obtenidos de forma adecuada para proceder posteriormente al análisis estadísticos de datos.

e) Efectuar la evaluación visual y el análisis de envejecimiento acelerado a las muestras obtenidas clasificando los resultados de acuerdo con las siguientes categorías cualitativas:

Muy Bueno (MB)

Bueno (B)

Regular (R)

Deficiente (D)

La evaluación visual examina color, textura y forma del producto final. El análisis de envejecimiento acelerado evalúa las mismas características, pero de muestras colocadas durante 8 semanas en un horno a 70° C.

8. RESULTADOS

Finalizada la etapa experimental de la investigación, se procedió a tabular los datos obtenidos en cada una de las corridas; dicha tabulación se encuentra en la sección de anexos bajo el título de Datos Experimentales. Se obtuvieron los promedios respectivos para los resultados de dureza y elongación en cada una de las corridas, y se tabuló y graficó dicha información.

En las páginas No. 42 y 43, aparecen las tablas de datos con los resultados finales de la investigación.

La tabla No.1 (pág. 42) muestra los resultados finales de dureza de producto final en función del tiempo de vulcanización para el producto suela translúcida para calzado de trabajo(Fórmula A_n).

La tabla No. 2 (pág. 42) muestra los resultados finales de porcentaje de elongación de producto final, en función del tiempo de vulcanización para el producto suela translúcida para calzado de trabajo (Fórmula A_n).

La tabla No. 3 (pág. 43) muestra los resultados finales de dureza de producto final, en función de tiempo de vulcanización para el producto de suela negra para calzado de trabajo o de uso diario (Fórmula B_n).

La Tabla No. 4 (pág. 43) muestra los resultados finales de porcentaje de elongación de producto final, en función del tiempo de vulcanización para el producto suela negra para calzado de trabajo o de uso diario(Fórmula B_n).

Con los datos que aparecen en las tablas anteriormente mencionadas se

TABLA No.1

TIEMPO DE VULCANIZACIÓN(min)	DUREZAS DE PRODUCTO FINAL (GRADOS SHORE A)			
	FÓRMULA A1	FÓRMULA A2	FÓRMULA A3	FÓRMULA A4
5.0	52.14	54.00	56.32	55.16
5.5	53.52	56.12	60.02	61.00
6.0	57.04	60.54	63.70	66.34
6.5	67.20	70.88	71.42	73.48
7.0	70.72	73.48	74.52	81.34
7.5	79.04	81.20	79.74	86.24

TABLA No. 2

TIEMPO DE VULCANIZACIÓN(min)	ELONGACIONES DE PRODUCTO FINAL(%)			
	FÓRMULA A1	FÓRMULA A2	FÓRMULA A3	FÓRMULA A4
5.0	245.6	219.8	188.6	178.0
5.5	200.2	189.8	150.4	122.8
6.0	142.8	112.2	118.4	81.0
6.5	111.0	96.8	86.8	66.4
7.0	86.6	82.4	71.8	50.2
7.5	72.4	69.0	53.4	30.8

TABLA No. 3

TIEMPO DE VULCANIZACIÓN(min)	DUREZAS DE PRODUCTO FINAL (GRADOS SHORE A)			
	FÓRMULA B1	FÓRMULA B2	FÓRMULA B3	FÓRMULA B4
5.0	48.72	51.00	53.90	54.70
5.5	51.66	53.58	56.36	56.93
6.0	57.01	58.52	61.16	64.66
6.5	66.20	67.68	70.08	72.56
7.0	70.68	72.38	76.16	79.88
7.5	75.62	77.62	79.72	84.58

TABLA No.4

TIEMPO DE VULCANIZACIÓN(min)	ELONGACIONES DE PRODUCTO FINAL (%)			
	FÓRMULA B1	FÓRMULA B2	FÓRMULA B3	FÓRMULA B4
5.0	218.8	214.8	188.8	177.8
5.5	140.6	139.2	132.2	130.4
6.0	115.6	103.4	96.6	84.2
6.5	103.6	94.0	78.4	70.8
7.0	88.0	82.0	61.0	52.2
7.5	72.2	67.2	47.8	41.2

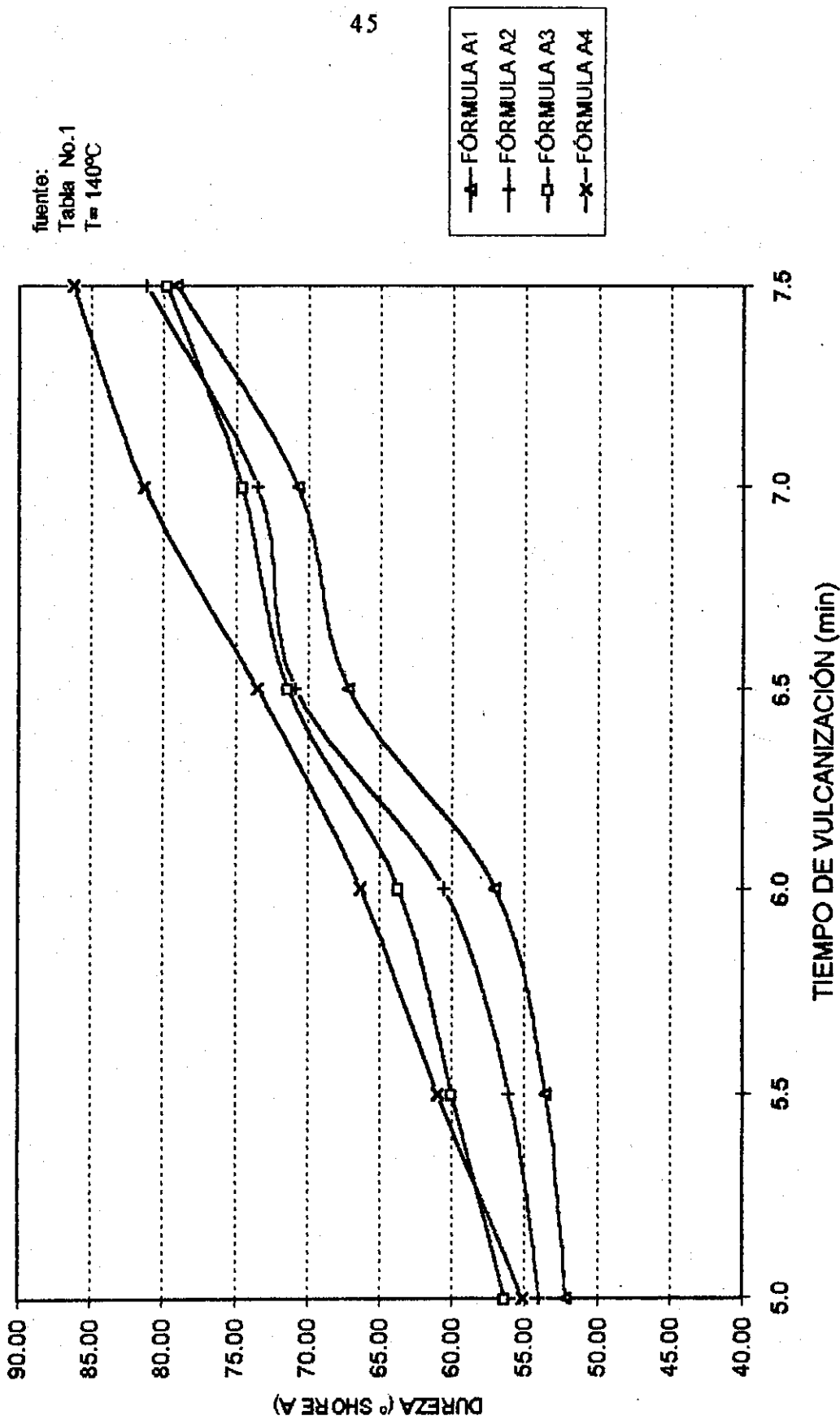
procedió a graficar en un plano cartesiano, colocando las variables dependientes dureza y porcentaje de elongación en el eje de las ordenadas, y la variable independiente tiempo de vulcanización en el eje de las abscisas.

En la Gráfica No. 1 (pág. 45), se observa el comportamiento de la dureza en función del tiempo de vulcanización para la fórmula A_n desde $n=1$ hasta 4; se puede notar que la dureza aumenta en función del tiempo y que para las distintas variaciones de la fórmula existe un desfase de mayor dureza para $n=4$ que desciende conforme n disminuye; esto se debe a que las concentraciones de azufre varían proporcionalmente en cada una de las fórmulas A_n aumentando un 0.1% w/w en cada fórmula; por eso las fórmulas con mayores cantidades de azufre tenderán a tener una vulcanización más acelerada que las que poseen cantidades menores.

En la Gráfica No. 2 (pág. 46), se observa el comportamiento del porcentaje de elongación a la ruptura en función del tiempo de vulcanización para la Fórmula A_n desde $n=1$ hasta 4; se pudo observar que el % de elongación disminuye en función del tiempo y que para las distintas variaciones de la fórmula, existe un desfase de mayor dureza para $n=1$ que desciende conforme n aumenta; esto obedece a que con menores concentraciones de azufre, el caucho conserva mejor sus cualidades elásticas después de vulcanizado; mientras aumenta la concentración de azufre, las cualidades elásticas disminuyen y por ende el % de elongación a la ruptura disminuye.

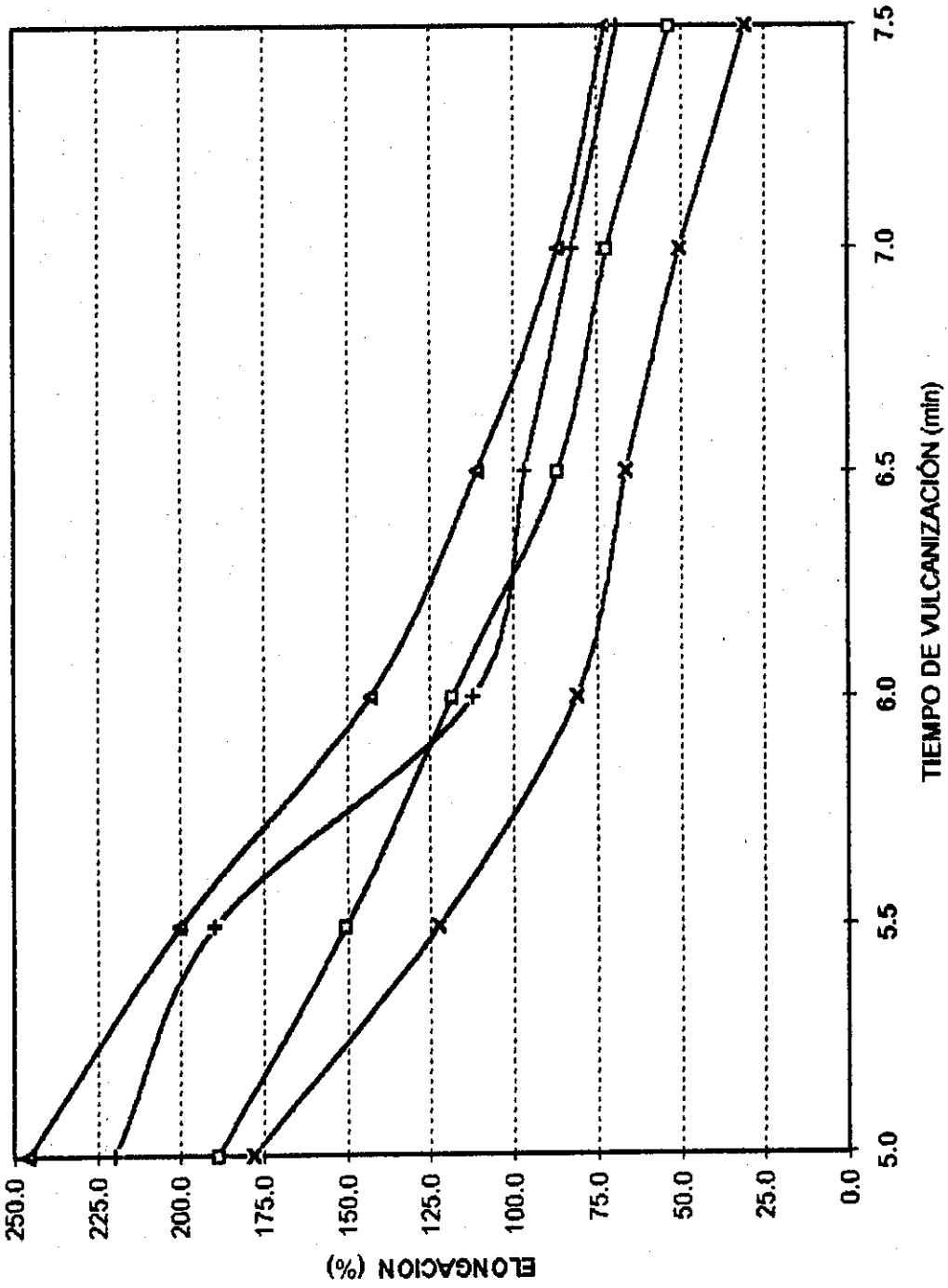
De igual forma en la Gráfica No. 3 (pág. 47) y Gráfica No. 4 (pág. 48),

GRÁFICA No. 1
DUREZA VRS TIEMPO (COMPUESTO A)



fuelle:
Tabla No 2
T= 140 °C

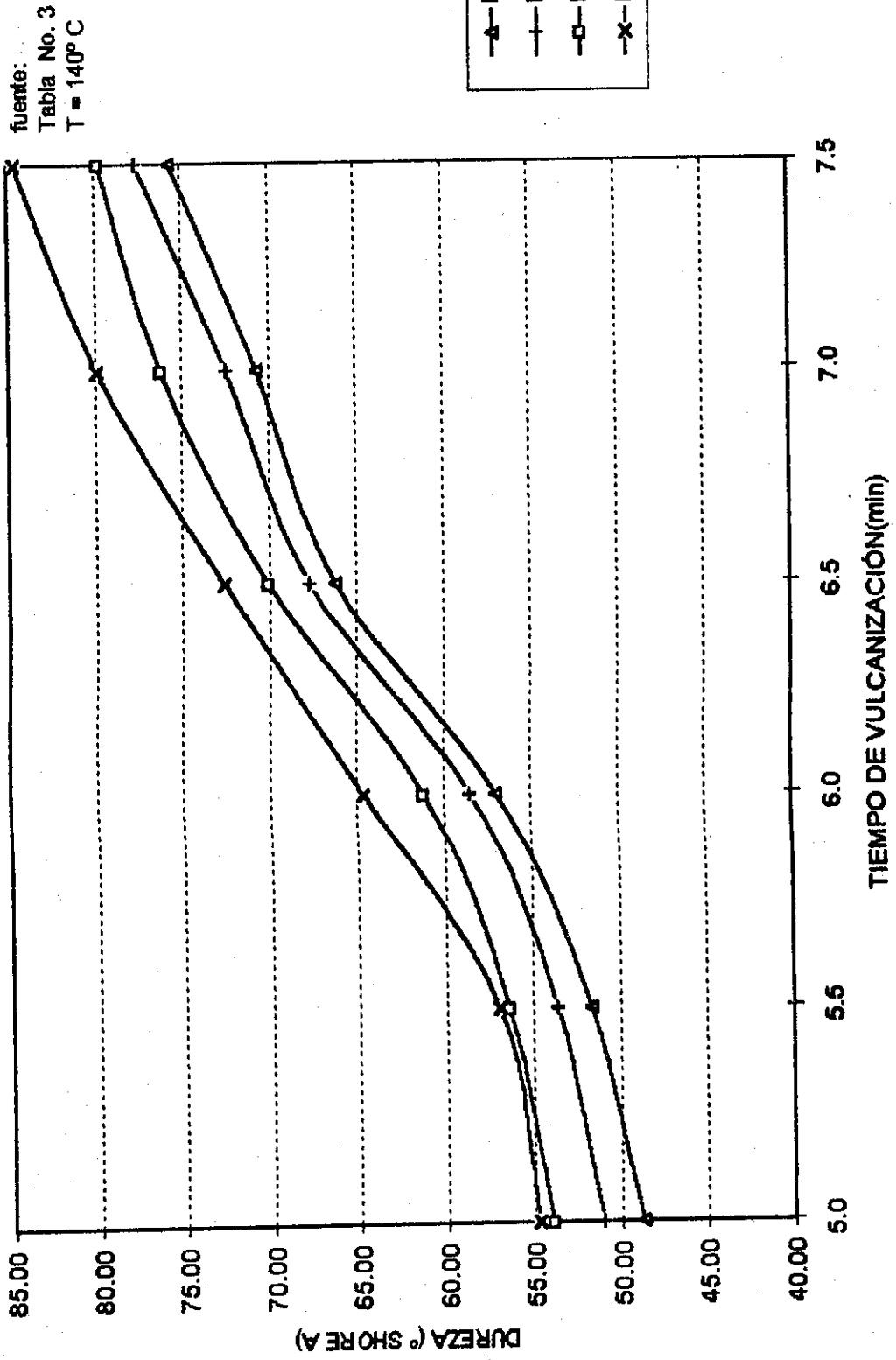
GRÁFICA No. 2
ELONGACIÓN VRS. TIEMPO (COMPUESTO A)



—▲— FÓRMULA A1
—+— FÓRMULA A2
—□— FÓRMULA A3
—x— FÓRMULA A4

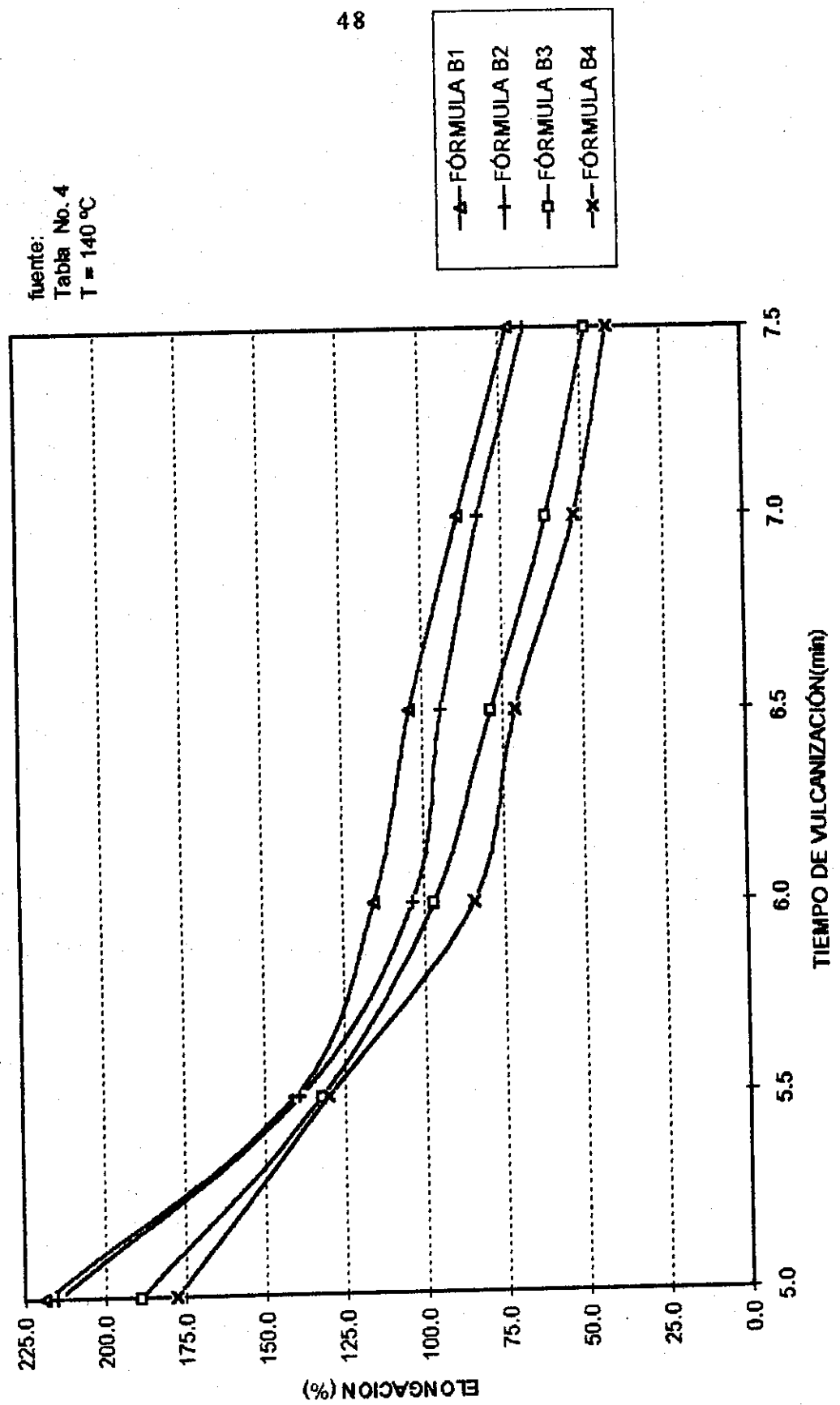
GRÁFICA No. 3

DUREZA VRS. TIEMPO (COMPUESTO B)



GRÁFICA No. 4
ELONGACIÓN VRS. TIEMPO (COMPUESTO B)

fuelle:
Tabla No. 4
T = 140 °C



—▲— FÓRMULA B1
—+— FÓRMULA B2
—□— FÓRMULA B3
—x— FÓRMULA B4

aparecen ilustrados los mismos tipos de comportamiento para la Fórmula B_n desde $n=1$ hasta 4; y se aplican las mismas explicaciones que para las Gráficas No. 1 y No. 2, las cuales aparecen ampliadas y sustentadas en la sección de Discusión de Resultados de esta tesis.

9.INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como objetivo fundamental de esta investigación, se intenta alcanzar una optimización del proceso de vulcanización en la línea de producción de dos nuevos compuestos a base de caucho natural; esto conllevó la realización de la fase experimental de la investigación al efectuar una serie de corridas (20 por fórmula) para poder encontrar el proceso óptimo, que se basa en las premisas de no modificar temperaturas de vulcanización ni presión de operación, esto conllevaría modificaciones en las restantes líneas de producción ya establecidas, lo que no podía hacerse porque se afectaría la productividad general de la planta; dicho de otra forma, la planta fue utilizada como laboratorio de pruebas, pero tenía restricciones importantes que respetar en este experimento para no afectar procesos paralelos.

Inicialmente se plantearon 8 fórmulas básicas(4 para el compuesto A y 4 para el compuesto B), las que aparecen en el Apéndice 3. Dichas fórmulas presentan variaciones en la concentración de agente vulcanizante(azufre), las que se compensan con modificaciones en la carga inerte de la fórmula.

Los datos experimentales obtenidos y que se muestran en el apéndice 2 y que aparecen resumidos en la Tabla 1 y Tabla 2 de la sección de Resultados; muestran las 5 corridas de cada fórmula A_n y B_n desde n=1 hasta n=4. Se muestran resultados de: Dureza(°Shore A), Elongación(%), evaluación visual y evaluación luego de envejecimiento acelerado. Los resultados obtenidos se graficaron y se muestran en las Gráficas No.1 a la No.4 (pag 45 a 48).

En la Gráfica No.1, se observa el comportamiento de la dureza en función del tiempo de vulcanización, tomando como base las especificaciones de calidad de producto final(Apéndice 4) y comparando los valores de los parámetros obtenidos desde $t=5.0$ min. hasta $t=7.5$ min. de vulcanización de la siguiente forma:

Para $t=5.0$ min., se tiene que las fórmulas A2, A3 y A4 han alcanzado el mínimo permisible para dureza; la fórmula A1 se elimina entonces para $t=5.0$ min.

Al analizar el porcentaje de elongación, ninguna de las 4 fórmulas para $t=5.0$ min., alcanza los valores exigidos, por lo que $t=5.0$ min. se descarta como una opción para tiempo óptimo.

Luego para $t=5.5$ min., se tiene que A1 no alcanza el mínimo de dureza por lo que se descarta, luego en elongación únicamente A4 alcanza el máximo permitido, pero al observar en datos experimentales(Apéndice 2) para 5.5 min., la fórmula A4 alcanza calificaciones de regular y bueno en textura y forma respectivamente, y al comparar con especificaciones de calidad no califica.

El análisis anterior se itera para cada uno de los tiempos de vulcanización estudiados y para cada fórmula $A_n(n=1$ a $n=4)$, y se resume en el cuadro 1.

CUADRO 1

Tiempo(min)	FÓRMULA A1					FÓRMULA A2					FÓRMULA A3					FÓRMULA A4					
	Dureza(°Shore A)	Elongación(%)	Color	Textura	Forma	Dureza(°Shore A)	Color	Elongación(%)	Textura	Forma	Dureza(°Shore A)	Elongación(%)	Color	Textura	Forma	Dureza(°Shore A)	Elongación(%)	Color	Textura	Forma	
5.0	X	X	OK	OK	X	OK	OK	X	OK	X	OK	X	OK	OK	X	OK	X	OK	OK	OK	X
5.5	X	X	OK	OK	X	OK	OK	X	OK	X	OK	X	OK	OK	X	OK	OK	OK	X	X	X
6.0	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	X	OK	X	OK	OK	X	X	X	X
6.5	OK	OK	OK	OK	OK	X	OK	OK	OK	X	X	OK	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.0	X	OK	OK	OK	X	X	OK	OK	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

CUADRO 2

Tiempo(min)	FÓRMULA B1					FÓRMULA B2					FÓRMULA B3					FÓRMULA B4					
	Dureza(°Shore A)	Elongación(%)	Color	Textura	Forma	Dureza(°Shore A)	Elongación(%)	Color	Textura	Forma	Dureza(°Shore A)	Elongación(%)	Color	Textura	Forma	Dureza(°Shore A)	Elongación(%)	Color	Textura	Forma	
5.0	X	X	OK	OK	X	X	X	OK	OK	X	X	X	OK	OK	X	OK	X	OK	OK	OK	X
5.5	X	OK	OK	OK	X	X	OK	OK	OK	X	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	X
6.0	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	X	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	X
6.5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	X	OK	OK	OK	OK	X	X	X	OK	X	X	X
7.0	X	OK	OK	OK	X	X	OK	OK	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.5	X	X	OK	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

ESTADO DE GUATEMALA

En el cuadro 1, puede observarse como únicamente 3 combinaciones fórmula-tiempo califican en todos los parámetros; estas son:

Fórmula A₁ → t=6.0 min.

Fórmula A₁ → t=6.5 min.

Fórmula A₂ → t=6.0 min.

Dicho cuadro también proporciona una idea de las tendencias de los parámetros estudiados en función de la variable tiempo(t) y concentración de vulcanizante [S], de la siguiente forma:

La dureza tiende a ser demasiado baja al inicio del proceso o con tiempos cortos de vulcanización, debido a que el material está crudo o semivulcanizado; conforme el tiempo de vulcanización avanza, el material se vulcaniza y adquiere una dureza compatible con las propiedades plásticas requeridas; pero si se excede en el tiempo, el material tiende a incrementar mucho éstas propiedades y se vuelve demasiado rígido. Con la elongación ocurre un efecto inverso; con tiempos de procesamiento bajos, la elongación es muy elevada, ya que las propiedades elásticas están muy desarrolladas; esto no es conveniente porque los productos finales fácilmente se deforman, al irse aproximando el tiempo al óptimo; la elongación tiende a ser más baja brindándole a las suelas las características deseadas, resistencia pero a la vez suavidad.

El parámetro más estable en el inicio del proceso de vulcanización es el color puesto que bajos cocimientos no le afectan significativamente, pero cuando los tiempos son elevados; el color tiende a hacerse más opaco y da mala presentación al producto final.

La textura también sufre trastornos muy significativos cuando se sobrevulcaniza el material, y presenta protuberancias muy grandes en toda la superficie de la suela; esta variable está estrechamente relacionada con la forma, la cual se ve severamente afectada, si la vulcanización es incipiente o si existe sobre vulcanización.

Tomando en cuenta estos parámetros y su respectiva evaluación, se determinó que la fórmula A2 con tiempo de 6.0 minutos de vulcanización es la más adecuada para el proceso de fabricación de suelas traslúcidas. La fórmula A1 también cumplía con los parámetros, pero a un tiempo mayor (6.5 min.), por lo que resulta más conveniente la A2 a 6.0 min. La fórmula A1 a 6.0 min. también cumple, pero en la forma alcanza levemente una calificación menor que la A2 por lo que se descarta como opción.

En la sección de Verificación de hipótesis, se emplea la fórmula A2 a $t=6.0$ min. para el cálculo del aumento de la productividad en la línea de fabricación de suelas traslúcidas y se obtiene de esta forma, la optimización del proceso, para la primera línea de producción analizada.

De manera análoga, se procede a analizar los resultados obtenidos para la fórmula para suelas negras. Observando la gráfica No.3(Pág.47), se observa el comportamiento de la dureza en función del tiempo, y en la gráfica No.4 (Pág. 48), se observa la tendencia de la elongación a la ruptura en función del tiempo de vulcanización; siempre tomando como referencia los parámetros de calidad de producto final(Apéndice 4), se comparan los valores obtenidos para las corridas desde $t=5.0$ min. hasta $t=7.5$ min., así:

Para $t=5.0$ min. se tiene que ninguna de las cuatro fórmulas B_n desde $n=1$ hasta $n=4$, cumple con los requisitos mínimos de calidad (ver cuadro 2), todas las fórmulas cumplen en cuanto a color y textura, pero en los parámetros físicos de dureza y elongación no cumplen, por lo que el tiempo de vulcanización de 5.0 min. se elimina como una alternativa para la fórmula B.

Se analiza, entonces, la opción de $t=5.5$ min.; siempre para la fórmula B; aquí se tiene que la fórmula B_3 cumple con los parámetros fijados para el producto final, y se logran niveles de dureza y elongación dentro de rango y calificaciones de muy bueno para la evaluación visual y envejecimiento en los factores de color, textura y forma. Las fórmulas B_1 y B_2 presentan, para este mismo tiempo de vulcanización, durezas muy bajas por lo que no son aptas para el proceso y la fórmula B_4 presenta una baja calificación en el aspecto de forma, debido a cierta sobrevulcanización debido a la alta concentración de azufre de la fórmula. El resumen del anterior análisis se presenta en forma resumida en el cuadro 2. (Pág. 52).

En el cuadro 2, se observa como únicamente cuatro combinaciones fórmula-tiempo de vulcanización dan como resultado un producto aceptable; éstas son:

Fórmula $B_3 \rightarrow t=5.5$ min.

Fórmula $B_1 \rightarrow t=6.0$ min.

Fórmula $B_3 \rightarrow t=6.0$ min.

Fórmula $B_1 \rightarrow t=6.5$ min.

Por lo que luego del análisis realizado, se determinó que la formula B3 con $t=5.5$ min. es la que optimiza el proceso de fabricación de suelas negras a base de caucho natural; en la sección de Verificación de hipótesis, se utiliza ésta fórmula para el desarrollo del cálculo del aumento de producción en la mencionada línea.

10. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Tomando como base la hipótesis planteada en esta tesis: "La producción global en la línea de vulcanización de los dos nuevos compuestos de hule natural destinados a la industria del calzado aumentará en más del 10% al optimizar el proceso"; se analizarán independientemente los resultados de cada compuesto, luego de la optimización sugerida como resultado de esta investigación.

COMPUESTO A: Suelas Translúcidas

La fórmula que optimiza el proceso, luego del análisis efectuado y que se discutió en la sección de interpretación de resultados, es la fórmula A2.

Si:

t_1 = tiempo de vulcanización antes de optimización.

t_2 = tiempo de vulcanización después de optimización.

BASE: 1 día de producción de suelas translúcidas #40.

$t_1 = 7.2 \text{ min.} \Rightarrow$ se le suma 1.0 min. de maniobra $\Rightarrow t_1 = 8.2 \text{ min.}$

$\Rightarrow (4 \text{ moldes/carga})(2 \text{ suelas/molde})(40 \text{ g/suela})(1 \text{ carga}/8.2 \text{ min.})$

$(60 \text{ min./hr})(24 \text{ hr/día})(1 \text{ kg}/1000 \text{ g}) = 56.19 \text{ Kg./día.}$

$t_2 = 6.0 \text{ min.} \Rightarrow$ se le suma 1.0 min. de maniobra $\Rightarrow t_2 = 7.0 \text{ min.}$

$\Rightarrow (4 \text{ moldes/carga})(2 \text{ suelas/molde})(40 \text{ g/suela})(1 \text{ carga}/7.0 \text{ min})$

$(60 \text{ min./1hr})(24 \text{ hr}/1 \text{ día})(1 \text{ kg}/1000 \text{ g}) = 65.83 \text{ Kg./día.}$

$\% \text{ de aumento de producción} = (9.64/56.19) \times 100 = 17.16\%$

COMPUESTO B: Suelas Negras

La fórmula que optimiza el proceso luego del análisis efectuado y que se discutió en la sección de interpretación de resultados, es la fórmula B3.

Si:

t_1 = tiempo de vulcanización antes de optimización.

t_2 = tiempo de vulcanización después de optimización.

BASE: 1 día de producción de suelas negras #40.

$t_1 = 6.8 \text{ min.} \Rightarrow$ se le suma 1.0 min. de maniobra $\Rightarrow t_1 = 7.8 \text{ min.}$

$\Rightarrow (4 \text{ moldes/carga})(2 \text{ suelas/molde})(44 \text{ g/suela})(1 \text{ carga}/7.8 \text{ min.})$

$$(60 \text{ min./hr})(24 \text{ hr/día})(1 \text{ kg}/1000 \text{ g}) = 64.98 \text{ Kg./día.}$$

$t_2 = 5.5 \text{ min.} \Rightarrow$ se le suma 1.0 min. de maniobra $\Rightarrow t_2 = 6.5 \text{ min.}$

$\Rightarrow (4 \text{ moldes/carga})(2 \text{ suelas/molde})(44 \text{ g/suela})(1 \text{ carga}/6.5 \text{ min.})$

$$(60 \text{ min./hr})(24 \text{ hr/día})(1 \text{ kg.}/1000 \text{ g}) = 77.98 \text{ Kg./día.}$$

$$\% \text{ de aumento de producción} = (13.00/64.98) \times 100 = 20.00\%$$

\Rightarrow El porcentaje de aumento global de producción es:

$$\% \text{ AUMENTO GLOBAL} = (22.64/121.17) \times 100 = 18.68\%$$

Con lo anteriormente expuesto, se concluye que la hipótesis planteada resulta válida.

11. CONCLUSIONES

1. Es posible la optimización de un proceso de vulcanización de un compuesto a base de caucho natural, al modificar únicamente los parámetros: tiempo de vulcanización y concentración de agente vulcanizante(azufre).
2. La dureza del material vulcanizado aumenta, y el % de elongación disminuye en función del tiempo de vulcanización, y estas variaciones son más rápidas al aumentar la concentración de azufre en el compuesto.
3. Para el compuesto de suelas translúcidas, se determinó que el tiempo óptimo de vulcanización es de 6 ± 0.20 minutos, con una concentración de azufre de $0.60 \pm 0.05\%$ en peso, para una temperatura de 140°C .
4. Se estableció que trabajando a una temperatura de 140°C , con una concentración de azufre de $0.70 \pm 0.05\%$ en peso, el compuesto de suelas negras tiene un tiempo óptimo de vulcanización de 5.5 ± 0.15 minutos.
5. Para un mismo tiempo de vulcanización y con diferentes concentraciones de azufre, se determinó que los valores de dureza obtenidos no superan los 6° Shore A.

12. RECOMENDACIONES

1. Se deben impulsar estudios sobre la optimización del proceso de vulcanización utilizando otras variables de proceso como: temperatura, concentración de acelerantes, otros tipos de caucho, etc.
2. Hay que establecer a la brevedad un área específica de laboratorio, y dotarlo con los equipos, materiales y personal que permitan mantener un mejor control de materias primas, proceso y producto terminado, y así poder realizar pruebas piloto que no interfieran con el proceso productivo.
3. Es necesario revisar constantemente las especificaciones de calidad de los productos, para mantener siempre satisfechas las necesidades de los consumidores.
4. Se debe crear un programa de capacitación continua sobre Calidad Total, para todo el personal involucrado directa o indirectamente en los procesos de fabricación.

BIBLIOGRAFÍA

1. FESSENDEN, Ralph. et.al. Química Orgánica. México: Grupo Editorial Iberoamérica.1983.
2. KIRK, Raymond. et.al. Enciclopedia de la tecnología química. México: Unión Tipográfica Editorial Hibernoamericana.1961.
3. MOLINA MOLINA, Claudio R. Estudio sobre el caucho natural, su tecnología y su situación nacional.(tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala) Guatemala, 1993.
4. ROGERS, Theodore. Enciclopedia of chemical technology. Estados Unidos:s.p.i. 1978.
5. VAN ESSEN, William. Rubber chemical technology. Estados Unidos: s.p.i. 1951.
6. ZAMORA CENTENO, Guillermo. Industria del caucho. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala) Guatemala, 1982.
7. ANNUAL REPORT ON THE PROGRESS OF RUBBER TECHNOLOGY.
W. Heffner and sons. ltd. Inglaterra:s.p.i. 1980.

8. **COMPOUNDERS HANDBOOK CHEMICALS FOR THE RUBBER INDUSTRY.** Monsanto rubber chemical division marketing technical service. Estados Unidos: s.p.i. 1981.

9. **ELASTOMER BONDING CHECKLIST.** Hughson Chemical Co. Estados Unidos: s.p.i. 1993.

10. **RUBBER DEVELOPMENTS.** Industry Developments Inc. Estados Unidos: s.p.i. 1990.

APÉNDICE 1

DATOS EXPERIMENTALES

DATOS EXPERIMENTALES FORMULA A1

Tiempo de Vulcanización	Corrida # 1		Corrida # 2		Corrida # 3		Corrida # 4		Corrida # 5		Promedio		Desviación Estandar	
	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación
5.00	52.1	242	52.4	246	51.9	247	52.1	247	52.2	246	52.1	245.6	0.1817	2.0736
5.50	53.3	203	53.6	200	53.4	199	53.7	199	53.6	200	53.5	200.2	0.1643	1.6432
6.00	56.8	140	57.0	143	57.1	146	57.2	144	57.1	141	57.0	142.8	0.1517	2.3875
6.50	67.2	112	67.1	110	67.1	110	67.3	113	67.3	110	67.2	111.0	0.1000	1.4142
7.00	70.4	87	70.6	86	70.7	87	70.9	87	71.0	86	70.7	86.6	0.2387	0.5477
7.50	78.9	73	79.3	72	79.2	71	79.0	71	78.8	73	79.0	72.0	0.2074	1.0000

Tiempo de Vulcanización	Evaluación Visual			Envejecimiento Acelerado		
	Color	Textura	Forma	Color	Textura	Forma
5.00	MB	B	B	MB	B	B
5.50	MB	B	B	MB	B	B
6.00	MB	MB	B	MB	B	B
6.50	B	MB	MB	B	MB	MB
7.00	B	B	B	B	B	B
7.50	R	R	R	R	R	R

DONDE:

Tiempo de Vulcanización = minutos

Dureza = ° Shore A

Elongación = %

MB = Muy Bueno

B = Bueno

R = Regular

D = Deficiente

DATOS EXPERIMENTALES FORMULA A2

Tiempo de Vulcanización	Corrida # 1		Corrida # 2		Corrida # 3		Corrida # 4		Corrida # 5		Promedio		Desviación Estandar	
	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación
5.00	53.9	221	54.0	218	54.1	219	54.0	221	54.0	220	54.0	219.8	0.0707	1.3038
5.50	56.2	190	55.9	191	56.1	188	56.2	190	56.2	190	56.1	189.8	0.1304	1.0954
6.00	60.2	115	60.6	112	60.7	110	60.6	112	60.6	112	60.5	112.2	0.1949	1.7889
6.50	70.4	98	71.2	96	71.1	96	70.8	97	70.9	97	70.9	96.8	0.3114	0.8367
7.00	73.6	83	73.5	80	73.4	83	73.4	83	73.5	83	73.5	82.4	0.0837	1.3416
7.50	81.2	69	81.1	68	81.1	69	81.3	69	81.3	69	81.2	68.8	0.1000	0.4472

Tiempo de Vulcanización	Evaluación Visual			Envejecimiento Acelerado		
	Color	Textura	Forma	Color	Textura	Forma
5.00	MB	B	B	MB	B	B
5.50	MB	MB	B	MB	B	B
6.00	MB	MB	MB	MB	MB	MB
6.50	B	B	B	B	B	B
7.00	R	R	R	R	R	R
7.50	R	D	D	R	D	D

DONDE:

Tiempo de Vulcanización = minutos

Dureza = ° Shore A

Elongación = %

MB = Muy Bueno

B = Bueno

R = Regular

D = Deficiente

DATOS EXPERIMENTALES FÓRMULA A3

Tiempo de Vulcanización	Corrida # 1		Corrida # 2		Corrida # 3		Corrida # 4		Corrida # 5		Promedio		Desviación Estándar	
	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación
5.00	56.1	188	56.3	190	56.4	187	56.4	187	56.4	191	56.3	188.6	0.1304	1.8166
5.50	59.8	151	60.1	149	60.2	151	60.1	151	59.9	150	60.0	150.4	0.1643	0.8944
6.00	63.4	120	63.6	118	63.7	117	63.9	118	53.9	119	61.7	118.4	4.3641	1.1402
6.50	71.3	88	71.4	87	71.5	86	71.4	86	71.5	87	71.4	86.8	0.0837	0.8367
7.00	74.4	70	74.6	72	74.7	73	74.6	72	74.3	72	74.5	71.8	0.1643	1.0954
7.50	79.2	52	80.3	51	79.9	53	79.6	54	79.7	57	79.7	53.4	0.4037	2.3022

Tiempo de Vulcanización	Evaluación Visual			Envejecimiento Acelerado		
	Color	Textura	Forma	Color	Textura	Forma
5.00	MB	MB	B	MB	MB	B
5.50	MB	MB	B	MB	MB	B
6.00	R	B	B	R	B	B
6.50	R	R	D	R	R	D
7.00	D	D	D	D	D	D
7.50	D	D	D	D	D	D

DONDE:

Tiempo de Vulcanización = minutos

MB = Muy Bueno

Dureza = ° Shore A

B = Bueno

Elongación = %

R = Regular

D = Deficiente

DATOS EXPERIMENTALES FÓRMULA B1

Tiempo de Vulcanización	Corrida # 1		Corrida # 2		Corrida # 3		Corrida # 4		Corrida # 5		Promedio		Desviación Estándar	
	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación
5.00	48.7	220	48.6	219	48.6	220	48.9	217	48.8	218	48.7	218.8	0.1304	1.3038
5.50	50.9	143	51.3	142	52.3	140	52.0	139	51.8	139	51.7	140.6	0.5595	1.8166
6.00	56.4	118	57.0	117	57.1	116	57.3	114	57.2	113	57.0	115.6	0.3536	2.0796
6.50	66.1	104	66.4	103	65.9	103	66.3	104	66.3	104	66.2	103.6	0.2000	0.5477
7.00	70.2	90	71.0	88	70.8	87	70.7	87	70.7	88	70.7	88.0	0.2950	1.2247
7.50	75.4	74	75.6	73	75.6	70	75.7	73	75.8	71	75.6	72.2	0.1483	1.6432

Tiempo de Vulcanización	Evaluación Visual			Envejecimiento Acelerado		
	Color	Textura	Forma	Color	Textura	Forma
5.00	MB	MB	B	MB	MB	B
5.50	MB	MB	B	MB	MB	B
6.00	MB	MB	MB	MB	MB	MB
6.50	MB	MB	MB	MB	MB	MB
7.00	MB	B	B	MB	B	B
7.50	B	R	R	B	D	D

DONDE:

Tiempo de Vulcanización = minutos

MB = Muy Bueno

Dureza = ° Shore A

B = Bueno

Elongación = %

R = Regular

D = Deficiente

DATOS EXPERIMENTALES FÓRMULA B3

Tiempo de Vulcanización	Corrida # 1		Corrida # 2		Corrida # 3		Corrida # 4		Corrida # 5		Promedio		Desviación Estándar	
	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación
5.00	53.6	190	54.0	187	53.8	189	54.1	189	54.0	189	53.9	188.8	0.2000	1.0954
5.50	56.1	132	56.3	131	56.0	131	56.7	134	56.7	133	56.4	132.2	0.3286	1.3038
6.00	61.0	98	60.9	96	61.2	98	61.3	97	61.4	94	59.2	96.6	4.3409	1.6733
6.50	69.2	78	70.4	79	70.1	77	70.3	81	70.4	77	70.1	78.4	0.5070	1.6733
7.00	76.3	61	75.9	60	76.2	62	76.0	61	76.4	61	76.2	61.0	0.2074	0.7071
7.50	79.4	50	80.0	48	79.7	47	79.8	47	79.7	47	79.7	47.8	0.2168	1.3038

70

Tiempo de Vulcanización	Evaluación Visual			Envejecimiento Acelerado		
	Color	Textura	Forma	Color	Textura	Forma
5.00	B	B	B	B	B	B
5.50	MB	MB	MB	MB	MB	MB
6.00	MB	B	MB	MB	B	MB
6.50	B	B	B	B	B	B
7.00	R	D	D	R	D	D
7.50	R	D	D	R	D	D

DONDE:

Tiempo de Vulcanización = minutos

Dureza = ° Shore A

Elongación = %

MB = Muy Bueno

B = Bueno

R = Regular

D = Deficiente

DATOS EXPERIMENTALES FÓRMULA B4

Tiempo de Vulcanización	Corrida # 1		Corrida # 2		Corrida # 3		Corrida # 4		Corrida # 5		Promedio		Desviación Estándar	
	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación	Dureza	Elongación
5.00	55.0	177	54.3	176	54.7	177	54.8	179	54.7	180	54.7	177.8	0.2550	1.6432
5.50	59.3	136	59.7	130	59.8	128	59.7	129	59.7	129	59.6	130.4	0.1949	3.2094
6.00	64.6	84	64.8	81	64.6	83	64.6	87	64.7	86	64.7	84.2	0.0894	2.3875
6.50	72.1	69	72.4	72	72.6	70	72.9	72	72.8	71	72.6	70.8	0.3209	1.3038
7.00	80.4	50	79.7	53	79.6	53	79.9	52	79.8	53	79.9	52.2	0.3114	1.3038
7.50	84.3	43	84.6	42	84.7	41	84.6	40	84.7	40	84.6	41.2	0.1643	1.3038

71

Tiempo de Vulcanización	Evaluación Visual			Envejecimiento Acelerado		
	Color	Textura	Forma	Color	Textura	Forma
5.00	MB	B	B	B	B	B
5.50	MB	B	B	MB	B	B
6.00	B	B	R	B	B	R
6.50	B	R	R	B	R	R
7.00	R	D	D	R	D	D
7.50	D	D	D	D	D	D

DONDE:

Tiempo de Vulcanización = minutos

Dureza = ° Shore A

Elongación = %

MB = Muy Bueno

B = Bueno

R = Regular

D = Deficiente

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE GUATEMALA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

APÉNDICE 2

FÓRMULAS PATRÓN

**FORMULA A: COMPUESTO PARA SUELAS TRANSLÚCIDAS PARA
SUELAS DE CALZADO DE TRABAJO**

INGREDIENTE	FÓRMULA	FÓRMULA	FÓRMULA	FORMULA
	A1 (%W)	A2(%W)	A3(%W)	A4(%W)
1.HULE NATURAL	56.18	56.18	56.18	56.18
2.ÓXIDO DE ZINC	1.12	1.12	1.12	1.12
3.ÁCIDO ESTEÁRICO	0.8	0.8	0.8	0.8
4.DIÓXIDO DE TITANIO	2.8	2.8	2.8	2.8
5.CARGAS	34.12	34.02	33.92	33.82
6.PLASTIFICANTES	3.92	3.92	3.92	3.92
7.ACCELERANTES	0.56	0.56	0.56	0.56
8.AZUFRE	0.5	0.6	0.7	0.8
TOTAL	100	100	100	100

HULE NATURAL: gutapercha y crepé

CARGAS REFORZANTES: silicato de aluminio y carbonato de magnesio.

CARGAS INERTES: carbonato de calcio, carbonato de aluminio y dixie clay.

PLASTIFICANTES: aceite parafínico, aceite mineral y resina.

ACCELERANTES: DPG, Santocure y Thiurad.

VULCANIZANTE: azufre.

**FÓRMULA B: COMPUESTO PARA SUELAS NEGRAS PARA
CALZADO DE TRABAJO O DE USO COTIDIANO**

INGREDIENTE	FÓRMULA B1 (%W)	FÓRMULA B2(%W)	FÓRMULA B3(%W)	FORMULA B4(%W)
1.HULE NATURAL	49.95	49.95	49.95	49.95
2.ÓXIDO DE ZINC	1.12	1.12	1.12	1.12
3.ÁCIDO ESTEÁRICO	1.56	1.56	1.56	1.56
4.CARGAS	43.84	43.74	43.64	43.54
5.PLASTIFICANTES	2.19	2.19	2.19	2.19
6.ACELERANTES	0.84	0.84	0.84	0.84
7.AZUFRE	0.50	0.60	0.70	0.80
TOTAL	100	100	100	100

HULE NATURAL: gutapercha y crepé.

CARGAS REFORZANTES: silicato de aluminio, carbonato de magnesio y negro de humo.

CARGAS INERTES: carbonato de calcio, carbonato de aluminio y dixie clay.

PLASTIFICANTES: aceite parafínico, aceite mineral, resina.

ACCELERANTES: DPG, Santocure y Thiurad.

VULCANIZANTE: azufre

APÉNDICE 3

ESPECIFICACIONES DE CALIDAD

DE PRODUCTO FINAL

ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DE PRODUCTO FINAL

Estas especificaciones corresponden a los productos siguientes:

- a) Suelas translúcidas
- b) Suelas negras

PARAMETRO	MINIMO	MAXIMO	OBJETIVO
Dureza(° Shore A)	54	70	62
Elongación(%)	78	150	114
Color	bueno	muy bueno	muy bueno
Textura	buena	muy buena	muy buena
Forma	muy buena	muy buena	muy buena

La evaluación visual de color, textura y forma se aplica tanto a la muestra recién vulcanizada como a las muestras después del período de envejecimiento acelerado.

APÉNDICE 4

PROPIEDADES RELATIVAS DEL
CAUCHO NATURAL

PROPIEDADES RELATIVAS DEL CAUCHO NATURAL

PROPIEDAD	CALIFICACIÓN
Fuerza de tensión	E
Resistencia al corte (frío)	B
Resistencia al corte (caliente)	B
Resistencia a la abrasión	E
Resistencia al envej. atmosférico	P
Resistencia a la oxidación	B
Resistencia al calor	B
Flexibilidad a baja temperatura	E
Nivel de compresión	R-B
Impermeabilidad	R
Resistencia a la llama	P
Resistencia a los álcalis	B
Resistencia a los ácidos(diluidos)	B
Resistencia a los ácidos(concent.)	R-B
Propiedades eléctricas	B-E
Resistencia a los solventes:	
Hidrocarburos alifáticos	P
Hidrocarburos aromáticos	P
Solventes clorados	P

Clave: P= pobre R= regular B= bueno E= excelente