



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

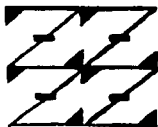
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**PROCESAMIENTO DEL HULE:  
REVISIÓN TEÓRICA DE  
ALGUNOS ASPECTOS**

REPORTE POR EXPERIENCIA PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO**  
P R E S E N T A  
**ALEJANDRO JUVENAL GUZMAN GOMEZ**  
DIRECTOR: ING. JOSE LUIS SÁNCHEZ TODOBERTO

MÉXICO, D. F.

SEPTIEMBRE DE 2002



LO HUMANO  
ES  
DE NUESTRA REFLEXION

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/055/02**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: GUZMAN GOMEZ ALEJANDRO JUVENAL**  
**P r e s e n t e**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>Presidente:</b>	<b>I.Q. Eduardo Loyo Arnaud</b>
<b>Vocal:</b>	<b>ING. José Luis Sánchez Todoberto</b>
<b>Secretario:</b>	<b>M. en C. Alejandro Rogel Ramírez</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q. Gonzalo Rafael Coello García</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q.I. Concepción G. Noroña Venegas</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**  
México, D. F., 18 de Junio de 2002

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**I.Q. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado de varios meses de dedicación, el fruto que el tiempo no niega cuando se tiene constancia y perseverancia, la culminación y la coronación justa al esfuerzo aplicado al logro de un objetivo.

Durante la mayor parte de la preparación del presente reporte, el esfuerzo realizado fue individual. Sin embargo, como en toda actividad humana, el trabajo colectivo es necesario para alcanzar el objetivo marcado, y ésta no fue la excepción. Quiero reconocer y agradecer sinceramente la participación directa e indirecta de varias personas para la realización de éste proyecto.

A mi asesor, Ing. José Luis Sánchez Todoberto, gracias mil por su tiempo y disponibilidad, por sus comentarios y observaciones que me permitieron enriquecer el contenido de éste reporte; a su secretaria, señorita Margarita Piña, por su amabilidad y cooperación.

A los integrantes del jurado, gracias por sus observaciones y por el tiempo que dedicaron a la revisión del presente.

A la jefatura de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, gracias por la molestia que se tomaron en atender las diferentes solicitudes que implican este tipo de trámites; a la sección de servicios escolares de Campo II de la misma Facultad, por su guía en el desarrollo de los trámites administrativos para la titulación.

En fin, gracias a todos por su participación, y a Ti por leer éste trabajo.

ATENTAMENTE  
ALEX

SEPTIEMBRE DE 2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## DEDICATORIAS


*Con Amor y respeto a la memoria de mi Madre, Carmen Estela Gómez, Gómez QPD, por darme la vida y prodigarme amor los primeros tres años de mi vida.*

*Con gratitud y admiración a mi padre, Juan Abelardo Guzmán Lorita, por su apoyo de toda la vida y de quien he aprendido que la educación es el medio para la superación personal; que la dedicación, constancia y perseverancia son los elementos para alcanzar los objetivos; y que el trabajo es el único medio para subsistir.*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con pasión y gusto a mi esposa, Irma Gómez Nuñez, por estos primeros 10 años de amor, comprensión, comunicación y confianza; y por su empuje para la realización de éste proyecto; sin el cual la tarea hubiera sido prácticamente imposible de culminarse.

Con Amor y cariño a nuestras hijas, Ixchel Melisa y Vanía Vanessa, a su gracia, a su simpatía, a su ternura y a su sinceridad; por esos momentos en que no he podido expresarles el gran amor que les tengo por encontrarme ocupado en la preparación de éste proyecto. Gracias por su comprensión.



PROCESAMIENTO DEL HULE:  
REVISIÓN TEÓRICA DE  
ALGUNOS ASPECTOS



# CONTENIDO



# PROCESAMIENTO DEL HULE: REVISIÓN TEÓRICA DE ALGUNOS ASPECTOS

## CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
<b>PARTE I COMPUESTO DE HULE</b>	
1) DEFINICIÓN	4
1.1) INTRODUCCIÓN	4
1.2) DEFINICIÓN	5
2) INGREDIENTES O COMPONENTES	7
2.1) ELASTÓMERO O POLIMERO BASE	7
2.2) CARGAS: REFORZANTES Y NO REFORZANTES	8
2.3) ADITIVOS: MODIFICADORES Y PROTECTORES	10
2.4) PLASTIFICANTES	11
2.5) AYUDAS DE PROCESO	12
2.6) SISTEMAS DE VULCANIZACIÓN	14
3) FORMULACIÓN O DISEÑO DE UN COMPUESTO DE HULE	21
3.1) OBJETIVOS DE LA FORMULACIÓN	21
3.2) CONSIDERACIONES	21
3.3) FORMULACIÓN DE COMPUESTOS DE HULE	25
<b>PARTE II OPERACIONES UNITARIAS EN LA INDUSTRIA HULERA</b>	
1) INTRODUCCIÓN	27
2) OPERACIÓN DE MEZCLADO	28
2.1) TIPOS DE MEZCLADO: EXTENSIVO, INTENSIVO	28
2.2) FENÓMENOS FÍSICOQUÍMICOS EN EL MEZCLADO INTENSIVO	30
2.2.1) MASTICADO Y PLASTIFICACIÓN	30
2.2.2) INCORPORACIÓN	32
2.2.3) DISPERSIÓN	33

2.2.4) DISTRIBUCIÓN	33
2.2.5) CALENTAMIENTO	34
2.2.6) FLUJO	35
2.3) EQUIPO PARA MEZCLADO INTENSIVO	37
2.3.1) MOLINO ABIERTO DE DOS RODILLOS	37
2.3.2) MEZCLADOR INTERNO: BANBURY	45
2.4) PROBLEMAS COMUNES EN LA OPERACIÓN DE MEZCLADO	48
3) OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN	52
3.1) FENÓMENO DE FLUJO	53
3.2) EQUIPO PARA LA OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN	59
3.2.1) EXTRUSOR DE TORNILLO SIMPLE	59
3.2.2) DADO DE EXTRUSIÓN	62
3.3) PROBLEMAS COMUNES EN LA OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN	66
4) OPERACIÓN DE CALANDRADO	69
4.1) REFINACIÓN	70
4.2) FRICCIÓN	70
4.3) RECUBRIMIENTO	70
4.4) PERFILES	71
4.5) RELIEVES	71
4.6) PROBLEMAS COMUNES EN LA OPERACIÓN DE CALANDRADO	73
5) OPERACIÓN DE VULCANIZACIÓN	75
5.1) INTRODUCCIÓN	75
5.2) DEFINICIÓN Y TEORÍA DE LA VULCANIZACIÓN	75
5.3) ENERGÍA TÉRMICA PARA LA VULCANIZACIÓN	79
5.4) MÉTODO Y EQUIPO PARA LA VULCANIZACIÓN	82
5.5) PROBLEMAS COMUNES EN LA OPERACIÓN DE VULCANIZACIÓN	87
6) CONCLUSIONES	89
7) BIBLIOGRAFÍA	94



# RESUMEN E INTRODUCCIÓN

---

## RESUMEN

El tema del procesamiento del hule es muy amplio, lo mismo que otras ramas industriales, ésta se encuentra con cambios frecuentes y evoluciona conforme se suceden las investigaciones y adaptaciones a los procesos existentes.

El alcance de éste proyecto incluye la presentación de algunos principios fundamentales de tres de los principales temas dentro del procesamiento y manufacturación de los productos de hule, y que además son básicos, ya que sustentan la mayor parte de los procesos industriales de esta rama en la actualidad. Dichos temas son: Mezclado, Extrusión y Vulcanización. Se expone en forma muy somera el tema de Calandrado, otro de los procesos involucrados en la fabricación de productos de hule. Además de la teoría para cada tema, ésta se complementa en algunos casos con los comentarios personales de un servidor, surgidos de la experiencia de haber laborado en esta rama industrial.

La información contenida en este reporte es básica, de manera que sea fácil de entender, y la explicación que se hace de cada tema se intenta con la mayor claridad posible.

Para su presentación, éste trabajo se divide en dos partes. En la primera parte, titulada "Compuesto de Hule", se da la definición de compuesto de hule, se explica brevemente la función de los ingredientes o componentes que lo integran, y se hace una descripción breve de los objetivos y consideraciones al realizar la formulación de un compuesto de hule.

En la segunda parte, titulada "Operaciones Unitarias", se explican las principales operaciones que se verifican durante la elaboración de los productos de hule, y que pueden tomarse como las operaciones unitarias en esta industria. Estas son el Mezclado, la Extrusión, la Vulcanización y en menor grado el Calandrado. Dentro de cada una de ellas se presentan algunos de sus fundamentos teóricos, así como los equipos empleados al aplicar dichas operaciones.

A grandes rasgos, estos son los puntos tratados en el presente reporte.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo del presente trabajo se basa en la experiencia profesional y personal de un servidor, acumulada durante un periodo de servicio de cinco años y medio (Junio de 1996 a Noviembre de 2001), en el área del procesamiento del hule; desempeñándome en el puesto de supervisor de producción, inicialmente en la sección de Mezclado y Tubulado, y posteriormente en la sección de Construcción y Vulcanización de una planta de cámaras para llantas.

Las intenciones al publicar esta experiencia, además de cumplir con el requisito denominado Titulación por Experiencia Profesional, una de las modalidades existentes en FES Zaragoza para obtener el título como Ingeniero Químico, son las siguientes:

- 1) Describir de manera breve algunos conceptos y temas que, como personal técnico de una planta de la industria de los productos de hule, un Ingeniero Químico requiere conocer;
- 2) Describir someramente las actividades que un Ingeniero Químico puede realizar, o los puestos y funciones que puede desempeñar dentro de la industria de los productos de hule;
- 3) Presentar las áreas o ramas de ésta industria en las que un Ingeniero Químico puede desarrollarse.

Revisando los trabajos publicados en el área de la Ingeniería Química, se observa que muy poco se ha difundido en nuestro campo el tema del procesamiento del hule. Aunque hay trabajos de tesis relacionados con éste tema, se percibe cierto grado de vacío de información sobre el mismo. El que se presenta ahora no pretende llenar el vacío mencionado, ya que falta mucho por hacer, pero sí pretende contribuir a la difusión del tema en cuestión, de manera que más gente del área de Ingeniería Química se interese por él, tanto de las nuevas generaciones como aquellas que ya tienen algún tiempo ejerciendo la profesión.

El objetivo guía que enmarca la publicación de esta experiencia es: **Difundir el tema del Procesamiento del Hule en la carrera de Ingeniería Química y mostrar que ésta rama industrial es parte de la Industria Química, y que por lo tanto, el Ingeniero Químico encuentra en ella áreas de oportunidad para su desarrollo.** Desde mi perspectiva personal, el presente trabajo, por su contenido y alcance, está enfocado principalmente a la gente que está iniciándose o por iniciarse como profesional dentro de la rama industrial de la manufacturación de artículos de hule. Así mismo, lo consideraría como una exposición o muestra hacia las generaciones de ingenieros químicos que se están preparando de lo que es ésta rama industrial, y que sepan que en ella tienen también una perspectiva de desarrollo profesional. Deseo que el lector de éste trabajo pueda obtener realmente algún dato importante y útil para sus objetivos.

Para lograr cubrir el objetivo guía de éste reporte, mencionado en el párrafo anterior, éste se ha de desglosar en dos objetivos generales y varios objetivos específicos, mismos que han de cubrir el temario propuesto como contenido de éste reporte.

Uno de los **objetivos generales** consiste en **exponer los aspectos relacionados con los Compuestos de Hule**, cuyos objetivos específicos son definir qué es un compuesto de hule, describir brevemente la función de sus ingredientes, y mencionar las consideraciones a cubrir al formular un compuesto de hule.

Otro de los **objetivos generales** está enfocado en **exponer algunos de los principios fundamentales de las principales operaciones unitarias en la Industria Hulera**, cuyos objetivos específicos son presentar las operaciones unitarias de la industria hulera, así como el equipo

empleado por cada una; así mismo comentar algunos de los principales problemas que pueden presentar algunas de estas operaciones unitarias. Dichas operaciones unitarias son el Mezclado, la Extrusión, el Calandrado y la Vulcanización.

Una vez planteado el objetivo guía de este reporte, la cuestión es si los objetivos generales y objetivos específicos propuestos permitirán alcanzarlo; es decir, ¿Exponer y analizar los diferentes procesos, operaciones y fenómenos de transferencia que ocurren en la Industria de Procesamiento del Hule, es suficiente para demostrar, que ésta es parte de la gran Industria Química, y atraer así hacia ella el interés del Ingeniero Químico, quien como Profesional capacitado en el área de Materiales, debe adoptarla como parte de su campo de acción?

Reiterando, la escasa información publicada sobre el tema representa una oportunidad para los profesionistas de la Ingeniería Química que hemos ejercido en ésta área para aportar algo de nuestras experiencias y conocimientos adquiridos sobre ella a los compañeros interesados y a las nuevas generaciones, con objeto de que conozcan otra alternativa en el campo de acción.

**PARTE I**

**COMPUESTO DE HULE**





# 1) DEFINICIÓN



# PARTE I COMPUESTO DE HULE

## 1) DEFINICIÓN

### 1.1) INTRODUCCIÓN

La historia de la industria hulera es muy amplia. Aunque el hule ya era conocido desde el siglo XI por la cultura maya, no fue sino hasta el siglo XIX, en el año de 1803, cuando se inició su industrialización. Durante todo este siglo sucedieron una serie de acontecimientos en torno al hule, entre los cuales se pueden destacar:

En 1821 Thomas Hancock inventó la primera máquina masticadora de hule crudo natural;

En 1839 Charles Goodyear descubrió accidentalmente la vulcanización del hule natural utilizando azufre;

En 1845 R. W. Thompson recubrió con hule las llantas de una carreta;

En 1846 Thomas Hancock fabricó la primera llanta de hule macizo;

En 1860 G. Williams obtuvo la composición química del hule natural, por destilación seca, descubriendo que el monómero es isopreno;

En 1882 W. A. Tilden obtuvo por primera vez el hule sintético a partir del aguarrás;

En 1888 J. B. Dunlop patentó la primera llanta neumática para bicicleta; y

En 1912 se produjo la primera llanta neumática para automóvil a base de hule sintético.

En nuestro país, en la actualidad el vocablo "hule" se emplea indistintamente para identificar al polímero base del compuesto de hule (elastómero), a un semiterminado obtenido en alguna etapa del proceso de fabricación del producto de hule o al producto final. Se toma como sinónimo de elastómero, o compuesto de hule.

Existen diferentes tipos de hules, y dependen del monómero base que se emplee para su formulación. Así, por ejemplo, se tiene el hule conocido como estireno-butadieno, que significa que el monómero básico empleado para su fabricación es el estireno-butadieno. Al igual que éste, existen muchos más tal como el hule isopreno cuyo monómero base es el isopreno, o el hule butadieno cuyo monómero base es el butadieno. Y así hay otros más. De este modo se observa que el hule adquiere el nombre del monómero básico de su composición.

Por su origen los hules se clasifican en dos tipos: Hule Natural y Hules Sintéticos. Existe un solo tipo de hule natural, y de hules sintéticos hay una variedad muy amplia.

El hule natural se forma a partir de la sabia de cierta variedad de árboles. La sabia del árbol se extrae de forma metódica conocido como picado y sangrado, ésta se coagula para formar el látex. Esta etapa inicia el proceso industrial de obtención del hule natural. Las variedades de árboles que son productores del hule natural son: El Hevea y el Guayule. De los tipos de Hevea, el de mayor uso por la calidad de la sabia que se obtiene es el Hevea Brasiliensis. Por lo tanto, la producción comercial del hule natural se realiza a partir del Guayule y del Hevea Brasiliensis. El monómero del hule natural es el isopreno o 2 metil 1,3 butadieno.

Los hules sintéticos se obtienen por las reacciones de polimerización de uno o más monómeros. Entre los hules sintéticos de mayor importancia comercial se encuentran el isopreno, el butadieno, el estireno-butadieno, el nitrilo, el butilo, el EPDM, el neopreno, entre otros. Todos estos son los nombres comerciales.

Lo anterior muestra que existe una gama amplia de hules sintéticos. Todos ellos se pueden emplear en forma individual o pueden ser combinados, ello dependerá de la aplicación a la que será destinado el producto y de los requisitos a cubrir en el servicio que desempeñe dicho producto.

Para que un hule pueda tener aplicación comercial, natural o sintético, debe experimentar el proceso químico de la vulcanización, que mejora enormemente sus diferentes propiedades. El hule antes de ser vulcanizado, o crudo como también se le puede llamar, presenta muchos inconvenientes que lo hacen prácticamente inútil para las aplicaciones que actualmente se le conocen, es un material pegajoso, se deforma con mucha facilidad y no recupera su forma original, es quebradizo, entre otras muchas desventajas.

El procesamiento del hule es una actividad muy compleja, consiste de varias operaciones que van desde la masticación inicial del hule o elastómero hasta la vulcanización del artículo terminado. Estas operaciones se conocen como mezclado, extrusión, calandrado, impregnación, moldeo y combinación con las telas, cuerdas textiles y cuerdas de acero. Se dice que la base de todos estos procesos y operaciones la constituye la deformación laminar o viscosa del elastómero, o dicho de otra manera, de su comportamiento reológico. También influyen otros factores como la naturaleza química y la reactividad del polímero. Sin embargo, el flujo físico es el factor predominante.

En nuestro país, la industrialización del hule se inició en el siglo XX, dando paso a la creación de varias de las empresas de este ramo que actualmente son líderes en la fabricación y comercialización de productos diversos, empleando como base tanto hule natural como hule sintético.

Existen agrupaciones que se encargan de difundir diversos temas en tomo al progreso y avance relacionados con el hule. En nuestro país se pueden mencionar a la Cámara Nacional de la Industria Hulera y al Grupo Hulero Mexicano.

## 1.2) DEFINICIÓN

**Compuesto de hule.**- Es el producto de la mezcla y combinación de un elastómero o elastómeros, con ingredientes conocidos como cargas reforzantes y no reforzantes; además de otros que hacen la función de aditivos, tanto modificadores como protectores del elastómero. Dentro de la industria hulera, el compuesto de hule, por lo general, es referido únicamente como hule como se había mencionado en párrafos anteriores.

Explicando la definición anterior de manera más amplia, el elemento básico que se requiere para formar un compuesto de hule es un elastómero (polímero con propiedades elásticas). Para utilizar este elastómero en la elaboración de productos de hule, es necesario mezclarlo con otros ingredientes (formación del compuesto de hule) para mejorar sus propiedades y características, y que generalmente, tienen dos efectos muy importantes sobre el mismo. El primero: modificar o alterar sus propiedades físicas, químicas o mecánicas. A estos ingredientes se les conoce como aditivos modificadores y como ejemplo se pueden mencionar a las cargas de relleno o refuerzo, los plastificantes, pigmentos para teñir, los aceleradores, agentes vulcanizantes, peptizantes, activadores, etc., y en algunos casos se les clasifica como ayudas de proceso.

El segundo efecto es la protección del elastómero para evitar su degradación, sea por agentes ambientales como son la luz solar, el ozono, el oxígeno, o por envejecimiento, o en casos especiales por agentes químicos. A estos ingredientes se les conoce como aditivos protectores y como ejemplo se pueden mencionar los antioxidantes, los antiozonantes, estabilizadores térmicos, estabilizadores de luz ultravioleta, agentes antiestáticos, etc.

El elastómero (hule) constituye cuando menos el 50% del total del compuesto, aunque esto puede variar dependiendo del uso final del compuesto; además de que las propiedades de éste son las empleadas como base en la formulación del compuesto; mientras que el restante 50% lo constituyen otros ingredientes que desempeñan funciones diferentes en el compuesto.



## 2) INGREDIENTES O COMPONENTES

## 2) INGREDIENTES O COMPONENTES

De acuerdo con la definición, dada anteriormente, en este apartado se verá con detalle los diferentes tipos de ingredientes que integran un compuesto de hule y que son conocidos con el nombre genérico de hule químicos, y que existe una variedad muy amplia.

Los hule químicos son materiales que se adicionan en cantidades menores a las formulaciones de hule con objeto de mejorar sus propiedades y hacerlos comercialmente útiles. Los polímeros base para los compuestos de hule, o elastómeros, tienen aplicaciones prácticas muy limitadas debido a varias propiedades que no les favorece como lo son su pegajosidad, flujo, y otras características indeseables. Los hule químicos son adicionados para mejorar la procesabilidad, promover la reticulación y proporcionar longevidad al compuesto en servicio.

Así, los ingredientes de un compuesto de hule son:

- Elastómeros o Polímero base
- Cargas: Reforzantes y No reforzantes
- Plastificantes
- Aditivos: Modificadores y Protectores
- Ayudas de Proceso
- Sistemas de Vulcanización: Activadores, Aceleradores y Agentes Vulcanizantes

### 2.1) ELASTÓMERO O POLÍMERO BASE

El principal componente de un compuesto de hule es un elastómero o mezcla de elastómeros, seleccionados para aplicaciones específicas, de acuerdo con una o varias de sus características.

Un elastómero es un polímero, natural o sintético, que posee propiedades elásticas. Es decir, es un polímero que puede deformarse al aplicarle una fuerza, y que recobrará aproximadamente sus dimensiones originales al retirar dicha fuerza. Existen entre 25 y 30 clasificaciones químicas de elastómeros; seis de estas clases representan el 90% de todos los elastómeros empleados.

Los monómeros más comunes para la obtención de los elastómeros son el estireno, butadieno, isobutileno, isopreno, etileno, propileno y acrilonitrilo. Sin embargo, existen numerosas especialidades. Los elastómeros o hules más comerciales son:

**Hule natural (NR):** La fuente comercial más importante del hule natural es el árbol conocido como Hevea Brasiliensis; aunque existen otras variedades de árboles de las cuales se puede obtener no tienen el potencial comercial del anterior. El polímero que da origen al hule natural es el poliisopreno.

Los elastómeros sintéticos se producen a partir de los monómeros obtenidos en el craqueo y refinación del petróleo. Comercialmente los más importantes son los que se describen a continuación.

**Hule Estireno-Butadieno (SBR):** Este elastómero se obtiene como producto de la copolimerización del estireno y el butadieno, tanto por el proceso de solución como el de emulsión.

**Hule Polibutadieno (BR):** Este elastómero se obtiene polimerizando el butadieno, y dependiendo del catalizador empleado se producen varios grados.

**Hule Etileno-Propileno (EPDM):** Este elastómero se obtiene como producto de la copolimerización del etileno y el propileno. Frecuentemente se adiciona un tercer monómero para proporcionar los sitios de insaturación y permitir el curado. El tercer monómero puede ser el dicitlopentadieno, el hexadieno, de ahí su denominación de hule etileno-propileno-dieno.

**Hule Butilo (IIR) y Hatobutilo (HIIR):** El hule butilo se obtiene por la polimerización de isobutileno, y se le adiciona una cantidad muy pequeña de isopreno para proporcionar los sitios de insaturación y curado. Por estos dos monómeros se le designa como IIR. La halogenación del hule butilo con bromo o cloro incrementa la velocidad de la reacción de vulcanización.

**Hule Nitrilo (NBR):** Este hule se obtiene por la copolimerización en emulsión del acrilonitrilo (9 -50%) y el butadieno, por eso la designación de NBR.

## 2.2) CARGAS

Los compuestos de hule normalmente requieren un **relleno inorgánico inerte**, conocido como **carga**, para cumplir con dos propósitos igualmente importantes. El primero de ellos está dirigido a reforzar al elastómero base para obtener un compuesto con ciertas propiedades; y el segundo está encaminado a disminuir el costo del compuesto sin modificar ninguna de las propiedades del elastómero base. Por lo tanto, existen dos tipos de **cargas: reforzantes y no reforzantes.**

### 2.2.1) CARGAS REFORZANTES

Son **ingredientes o elementos del compuesto que**, como lo indica su nombre, **reforzarán algunas propiedades del mismo, sobre todo sus propiedades mecánicas**, tales como el módulo, resistencia a la tensión, a la abrasividad, al corte, etc., modificarán su dureza, sus propiedades de vulcanización, de elongación, la tensión, entre otras propiedades. Los más empleados son: **el negro de humo** en sus diferentes tipos; **las sílicas y los silicatos** también en sus diferentes tipos, naturales y sintéticas, entre otros materiales.

#### 2.2.1.1) NEGROS DE HUMO

Es el principal agente reforzante usado en la industria hulera. Aunque era conocido desde la antigüedad, sus efectos reforzantes en el hule fueron reconocidos hasta principios del siglo XX cuando se desarrollaron las llantas.

El comportamiento reforzante del negro de humo se puede determinar ampliamente por tres parámetros, que son: **área superficial, estructura y energía superficial.**

- **Área Superficial.**- El tamaño de la partícula da el área superficial. A menor tamaño de partícula mayor área superficial de la carga. A mayor área superficial de la carga mayor grado de reforzamiento del compuesto

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- **Estructura.-** Es un factor geométrico y está relacionado con el grado de agregación de las partículas de la carga. Más partículas agregadas mayor estructura.
- **Energía Superficial.-** Se refiere a los enlaces específicos entre la carga y el elastómero y a las fuerzas de atracción entre las partículas de la carga.

Existe una gama muy amplia de negros de humo, y el tipo depende básicamente del tamaño de partícula. Existe una clasificación emitida por la ASTM y que es la que se emplea actualmente en la industria hulera.

Los negros de humo pueden ser clasificados en alta dureza (negros reforzantes), baja dureza (negros semireforzantes) y extendedores.

Los negros de humo de alta dureza son caracterizados por una alta área superficial y tamaño de partícula pequeño. La característica más importante de éstos es su habilidad para incrementar la resistencia a la abrasión de los compuestos de hule. Son usados principalmente en el piso de las llantas.

Los negros de humo de baja dureza o semireforzantes están caracterizados por una baja área superficial y tamaño de partícula alto. Sus características principales son una buena procesabilidad y elevadas propiedades dinámicas (baja generación de calor). La aplicación típica es la carcasa de las llantas y productos extruidos como mangueras y perfiles. La alta estructura de los negros de humo se prefiere para hacer perfiles debido a que imparten un bajo hinchamiento y superficies muy lisas en los productos terminados.

Los negros de humo extendedores imparten un reforzamiento muy limitado a los compuestos de hule y son empleados en artículos en donde el reforzamiento requerido es mínimo. El tamaño de partícula es muy alto.

### 2.2.1.2) SÍLICAS

Las sílicas y silicatos son el segundo grupo más importante de cargas reforzantes usados en el hule (después de los negros de humo).

Entre las cargas blancas sintéticas, el silicato de aluminio era usado ampliamente y en la mayoría de las aplicaciones, pero ha sido reemplazado por las sílicas precipitadas como lo es el óxido de silicio y el silicato de sodio.

Las sílicas precipitadas de mayor interés en la industria del hule son aquellas que tienen un tamaño de partícula similar al del negro de humo y capaces de impartir un alto grado de reforzamiento.

Los compuestos de hule formulados con sílicas precipitadas tienen, por lo general, una velocidad de vulcanización muy lenta cuando el agente vulcanizante es el azufre, ya que la presencia de sílica inhibe el curado. Este inconveniente se puede solucionar por la adición de activadores. La gran área superficial de las sílicas provoca un efecto de desequilibrio ya que afecta las uniones formadas entre los polímeros y los puentes de azufre.

El efecto de la concentración de sílicas precipitadas es muy similar al que se logra con el negro de humo. Por lo general, al aumentar la concentración de sílicas se logra un incremento en la tensión, el módulo, la dureza, la resistencia a la abrasión y la viscosidad Mooney, y una disminución en la elongación en el producto final.

## **2.2.2) CARGAS NO REFORZANTES**

Es un ingrediente que se emplea únicamente como un relleno en el compuesto, cuyo objetivo principal es la disminución del costo del compuesto, y con esto reducir el costo del producto final. Los más empleados para este objetivo son: arcillas, talcos, carbonato de calcio, caolín, óxido de zinc (aunque el mayor uso de éste en la industria del hule es como activador de la reacción de vulcanización), tierra diatomacea, y otros más.

Un comportamiento general de los compuestos de hule con la inclusión física de las cargas no reforzantes, es el incremento del módulo y disminución de la elongación, y en algunos casos ligero aumento de la tensión. Aunque cada tipo de carga afecta en forma particular al compuesto en que se incluye.

Una característica común entre las cargas no reforzantes es que tienen un tamaño de partícula grande, de ahí que no impartan ningún reforzamiento al compuesto en que se incluyen; además de que, evidentemente, tienen que ser mucho más baratas para justificar su uso.

## **2.3) ADITIVOS**

### **2.3.1) ADITIVOS MODIFICADORES**

Es el o los ingredientes del compuesto que alteran las propiedades físicas y/o químicas del elastómero o del compuesto; esto es, modifican las propiedades que se verán reflejados en el compuesto que se obtiene. Hay muchos tipos y ejemplos de éstos aditivos, entre los cuales se incluyen los siguientes.

Las cargas reforzantes, como se definió en el apartado anterior, se emplean para incrementar la tenacidad del elastómero o el compuesto. El efecto más importante es la notable mejora en la resistencia a la abrasión, que en el servicio del producto final es importante cuando se trata de llantas, bandas transportadoras, etc.

Los plastificantes se usan cuando se desea incrementar la flexibilidad del compuesto de hule. Estos por lo general son aceites de hidrocarburos.

La adición de promotores de la reticulación (agente vulcanizante) con objeto de llevar a efecto el curado del compuesto, con el cual se obtendrá el efecto de la vulcanización pasando el compuesto desde un estado termoplástico a un estado termofijo.

La adición de otro elastómero modifica a menudo las propiedades del polímero base.

Para obtener productos esponjosos o espumados se usan agentes de expansión, que son sustancias químicas que reaccionan a una temperatura conveniente del proceso y desprenden un gas que es expulsado y produce espuma.

Un aditivo modificador también importante es el pigmento o colorante para teñir el producto.



### 2.3.2) ADITIVOS PROTECTORES

Es el o los **ingredientes del compuesto que protegen al elastómero del ataque de algunos agentes externos**, de manera que se prolonga la vida útil del producto final. Hay muchos tipos y ejemplos de éstos aditivos, algunas categorías representativas se describen a continuación.

Los antioxidantes se usan para proteger al elastómero contra la oxidación atmosférica. Muchos elastómeros tienen en sus cadenas moleculares sitios que son susceptibles al ataque del oxígeno, lo cual provoca que la cadena se acorte y empeoren las propiedades. La función de los aditivos antioxidantes es contrarrestar el ataque del oxígeno, impidiendo químicamente la serie de reacciones que conducen a la escisión de la cadena molecular. Los antioxidantes son necesarios para evitar la oxidación durante el proceso de fabricación y, también, para proteger la estructura del polímero durante la vida útil del producto. En los procesos de fabricación, los polímeros a menudo están expuestos a condiciones bastante severas de temperatura y corte, lo cual favorece el ataque del oxígeno.

Los estabilizadores térmicos tienen una función similar, ya que evitan la degradación a las altas temperaturas del proceso.

Los antiozonantes son un tipo especial de antioxidantes. Los dobles enlaces de las moléculas del elastómero son muy sensibles al ataque del ozono, aún a la baja concentración que hay en el aire. El ataque se vuelve más riguroso cuando el elastómero está sometido a esfuerzos.

También son importantes los estabilizadores de luz ultravioleta. Una de las reacciones iniciadoras, la que desencadena una degradación oxidante, es el ataque que lleva a cabo la radiación ultravioleta en los sitios reactivos del elastómero. La función de los estabilizadores ultravioleta es absorber preferencialmente este tipo de radiación y emitiría de nuevo a menor longitud de onda sin causar ningún daño.

Los agentes antiestáticos son útiles para evitar cargas estáticas indeseables, ya sea durante el proceso de fabricación, o bien, durante la vida de servicio del producto.

En casos especiales será necesario incorporar al compuesto de hule algunos aditivos que lo protejan contra el ataque de solventes, aceites u otros productos químicos, con los cuales esté en contacto el producto final.

### 2.4) PLASTIFICANTES

Los **plastificantes** más populares son los aceites derivados del petróleo. Éstos son empleados en cantidades considerables para **controlar la viscosidad del compuesto crudo o en verde** (como también se le llama al compuesto antes de vulcanizarlo) y **la dureza del compuesto vulcanizado**. Los plastificantes también son llamados **ablandadores** o **extendedores**. El término **extendedor** es usado para indicar que el aceite es utilizable con cargas reforzantes de manera que se disminuya el costo del compuesto, es decir, hasta cierto punto actúa como una carga. El término **plastificante** se aplica para resaltar la **habilidad del aceite de actuar como un lubricante interno para propósitos de proceso**, así como mejorar la **flexibilidad del producto vulcanizado a bajas temperaturas**.

Los aceites de petróleo son de tres tipos básicamente: **aromáticos, nafténicos y parafínicos**. Los aceites aromáticos contienen materiales peligrosos que requieren precauciones especiales al manejarlos, lo cual no es impedimento para su uso. Estos "mojan" o "humedecen" más fácilmente

el negro de humo que los aceites saturados, lo que a su vez mejora la dispersión al realizar la mezcla (ver sección de mezclado). Los aceites nafténicos no contienen materiales peligrosos en el mismo grado. Debido a estas consideraciones los aceites nafténicos están aumentando su uso. Los aceites parafínicos se usan muy poco como plastificante en la industria hulera. Su aplicación está dada para hules muy específicos ya que requiere ciertas consideraciones de formulación para su uso óptimo.

El aceite plastificante tiene una marcada influencia, tanto en las etapas de proceso, como en las propiedades físicas del compuesto de hule en que se incorpora. Por ésta razón es muy importante seleccionar correctamente el tipo y la cantidad de aceite a emplear como plastificante. Algunas de las propiedades físicas del compuesto que son favorablemente afectadas por el aceite plastificante son: dureza, propiedades a baja temperatura, resistencia al desgarre, elongación, entre otras.

Antes de seleccionar un aceite para su aplicación como plastificante en un compuesto de hule, deben tomarse en cuenta factores tales como: compatibilidad con el elastómero, color del aceite, permanencia, y costo.

La compatibilidad se refiere a la afinidad química que debe de existir entre el elastómero y el aceite, de manera que al mezclarlos se logre la incorporación de uno en el otro formando una sola fase. La incompatibilidad entre el aceite y el elastómero puede manifestarse como un "sangrado" o "migración" del primero hacia la superficie del compuesto, o incluso, del producto ya terminado. Este fenómeno probablemente no se manifieste inmediatamente después del mezclado, sino que aparece hasta que el producto ya está en servicio, particularmente cuando esté sujeto a condiciones drásticas de temperatura.

Cuando se requiere que el producto final tenga color, se debe tener en cuenta el color del aceite plastificante al seleccionarlo, ya que este tiene una influencia muy marcada sobre el color de aquel y sobre la estabilidad del mismo. Se debe seleccionar un aceite que no deje color en el producto final. Los aceites aromáticos y altamente aromáticos se emplean en aquellos casos en que el color no es importante; los aceites nafténicos de baja coloración son los que se deben emplear cuando el producto final no debe decolorarse.

La permanencia del aceite se refiere a que no debe haber pérdidas de éste por volatilidad a las altas temperaturas que se encuentran durante el proceso. Debe permanecer dentro del compuesto, es decir, debe ser compatible. La permanencia puede mejorar seleccionando un aceite de viscosidad y peso molecular adecuados.

A pesar de atribuirse una o más ventajas a un plastificante en particular, el formulista o formulador debe considerar el costo. Afortunadamente los plastificantes derivados del petróleo están disponibles a precios bajos y son considerablemente más baratos que cualquiera de los elastómeros en los que son empleados.

## 2.5) AYUDAS DE PROCESO

Dentro de la industria hulera, se le conoce como **ayudas de proceso** a todos aquellos materiales que se emplean para mejorar la procesabilidad de un compuesto de hule a lo largo de las etapas involucradas en la fabricación de un producto final, como puede ser el trabajo en molinos, la extrusión, el calendrado, la inyección, etc., sin una mayor contribución a las propiedades del artículo ya vulcanizado. Estos materiales son usados en menores cantidades dentro de la formulación del compuesto de hule.

Algunas de las ayudas de proceso que más se emplean son los ácidos grasos, resinas, aceites vegetales vulcanizados, entre otros. Otros materiales que pueden considerarse como ayudas de proceso son los aceites plastificantes que ya se vieron en la sección anterior, y los agentes peptizantes, que se verán más adelante.

Los principales beneficios de las ayudas de proceso son: (1) la mejor incorporación de las cargas reforzantes reduciendo frecuentemente los tiempos y la energía de mezclado; (2) reducción de la fricción interna para facilitar el trabajo en molinos, extrusión y calandrado; (3) facilitar la compatibilidad entre los diferentes elastómeros del compuesto para mejorar el procesamiento, así como para mejorar la adhesión del compuesto a otros compuestos en un artículo fabricado a base de varios compuestos diferentes (por ejemplo las llantas neumáticas); y (4) proporcionar mejora a la adherencia en verde que presenta el compuesto.

Actualmente existe una tendencia de los proveedores de ésta industria de desarrollar materiales multifuncionales; esto es, a la vez que mejoran la incorporación de las cargas reforzantes, mejoran el trabajo en molinos e incrementan la adherencia del compuesto, le imparte menor rigidez, mejorando significativamente la resistencia al desgarre en el compuesto vulcanizado.

Las ayudas de proceso pueden dividirse en externas e internas. Las ayudas de proceso externas actuarán entre el compuesto y la maquinaria por la cual se procesa el compuesto de manera que se faciliten las operaciones (talcos, antiadherentes, lubricantes). Las ayudas de proceso internas actuarán únicamente dentro del compuesto y sus ingredientes con objeto de facilitar o mejorar su procesabilidad. Principalmente se aplican para reducir la viscosidad del hule y mejorar el flujo. Generalmente las ayudas de proceso internas y externas se combinan para aumentar el efecto.

### 2.5.1) AGENTES PEPTIZANTES

Como se mencionó anteriormente, el procesamiento del hule frecuentemente requiere la modificación de la viscosidad con objeto de mejorar su procesabilidad, reducir la temperatura de mezclado, mejorar la dispersión e incorporación de las cargas reforzantes, incrementar la adherencia del elastómero y mejorar su lubricidad para extrusión y moldeo. Estos efectos se logran perfectamente con los **agentes peptizantes**, los cuales actúan rápidamente **reduciendo el peso molecular del elastómero (por escisión de la cadena) y a la vez su viscosidad Mooney**. Este tratamiento no afecta adversamente la velocidad de vulcanización o las propiedades físicas del compuesto curado.

La "peptización" o ruptura de cadenas moleculares puede ocurrir bajo altos esfuerzos en el mezclado o molinado, generando radicales poliméricos. Esto ocurre durante la etapa del masticado del elastómero. Debido a que muchos radicales se forman en esta etapa, se dice que los agentes peptizantes promueven la oxidación.

## 2.6) SISTEMAS DE VULCANIZACIÓN

### 2.6.1) ELASTÓMEROS VULCANIZABLES

Todos los elastómeros vulcanizables tienen una característica en común: cierto grado de insaturación dentro de su estructura polimérica, que de una manera simple se define como la presencia de dobles enlaces entre los átomos de carbono, distribuidos periódicamente a lo largo del esqueleto molecular del polímero a procesar. Los elastómeros en este estado poseen propiedades semejantes a los polímeros plásticos, aunque no necesariamente las propiedades útiles que los materiales termoplásticos podrían tener. En particular, el material se suavizará o ablandará con el calor y retornará a su estado original cuando se enfríe; un proceso que podrá ser repetido de manera ilimitada suponiendo que ningún otro efecto lateral o reacciones ocurrirán.

Debido a este comportamiento, los elastómeros pueden ser mezclados efectivamente con otros ingredientes. Después de ésta etapa se debe preformar o configurar el material conforme al artículo que se quiere fabricar, ya sea por extrusión, calandrado, etc. Hasta éste punto, no hay distinción fundamental entre las características de procesamiento entre los plásticos y los elastómeros.

Una vez que el material ha sido preformado, aquel que es termoplástico simplemente se enfría para completar el proceso. El elastómero vulcanizable, por otra parte, debe experimentar la reacción de vulcanización para completar el proceso, antes que el producto se enfríe. Las reacciones de vulcanización son aquellas que promueven el ataque a los dobles enlaces carbón-carbón. Durante la vulcanización éstos enlaces se rompen y permiten su reacción con otros materiales tales como el azufre u otros que también promueven la reticulación, en donde las cadenas adyacentes de polímero atacan a las contiguas y así sucesivamente; o para promover enlaces simples de átomos de carbón a cadenas de polímeros adyacentes dando un resultado similar a los enlaces cruzados. Una vez que esta reacción toma lugar, el proceso es tan irreversible como aquella reacción a través de la cual se obtuvo el elastómero. Por lo tanto, la vulcanización puede ser considerada como un cambio permanente sobre el material elastomérico.

Como se explica a continuación, existen comercialmente varios tipos de agentes vulcanizantes, y por lo tanto, varias formas o sistemas de curado de los cuales se puede echar mano para fabricar algún compuesto requerido. El más común es el sistema de curado que emplea el azufre como agente vulcanizante, y es el que se incluye en el presente trabajo.

### 2.6.2) AGENTES VULCANIZANTES

Para que el fenómeno de la vulcanización ocurra en el seno del elastómero o del compuesto de hule, además de los diferentes aditivos que se requieren, debe de incorporarse como parte del compuesto los elementos que actuarán como generadores de enlaces cruzados o promotores de la reticulación, que son sustancias que promoverán la unión entre las cadenas poliméricas del mismo, o que servirán de puentes o puntos de unión entre dichas cadenas poliméricas, mejorando así sus propiedades mecánicas, físicas y químicas. Estas sustancias o elementos se conocen como **agentes vulcanizantes**. En otras palabras, para que un elastómero se pueda vulcanizar, debe de adicionársele un agente o agentes vulcanizantes, o de lo contrario, la vulcanización no ocurrirá y nuestro compuesto no alcanzará la mejora en sus propiedades.

Existen diferentes tipos de agentes vulcanizantes o generadores de enlaces cruzados, que pueden ser un grupo de átomos de azufre en una cadena corta, un solo átomo de azufre, un

enlace carbono-carbono, un radical orgánico polivalente, un grupo de iones, o un ion metálico polivalente.

### 2.6.2.1) AZUFRE

El agente vulcanizante más utilizado desde el descubrimiento de la vulcanización es el azufre, debido principalmente a que los elastómeros de mayor aplicación comercial poseen en su estructura molecular dobles enlaces (dienos o puntos de insaturación), que son los puntos sobre los cuales actúa el azufre al someter al proceso de curado el compuesto elastomérico. Ejemplo de elastómeros con puntos dieno son el hule natural (NR), el estireno-butadieno (SBR), polibutadieno (BR), el etilen-propileno-dieno (EPDM), entre otros. El grado de reticulación de los elastómeros insaturados es pequeño, aproximadamente del 10 % como máximo.

El azufre empleado puede existir en su forma rómbica, como una estructura cíclica o anillo de ocho átomos. El azufre insoluble es una forma polimérica amorfa, con pesos moleculares de 100000 a 300000. Debido a esto el material es insoluble en los compuestos elastoméricos, y resiste la migración hacia la superficie antes del curado.

La vulcanización de un compuesto de hule empleando el azufre como agente vulcanizante, es un proceso químico mediante el cual las cadenas individuales de polímero se unen en una red tridimensional, conectadas por átomos de azufre como puntos de unión.

Antes de la vulcanización, el hule puede ser manipulado y moldeado en una variedad amplia de formas. Si se le permite relajarse, frecuentemente pierde sus formas predeterminadas y lentamente retorna a su forma indefinida o su estado amorfo. Este proceso es conocido como flujo en frío. Después de la vulcanización, el hule retiene su forma predeterminada, debido a que los enlaces cruzados logrados con los átomos de azufre, esencialmente fijan o retienen la estructura de red en un solo lugar. Un hule vulcanizado se retrae fuertemente a su forma moldeada después de que ha sido deformado por algún tipo de esfuerzo mecánico. Por lo tanto, se incrementa la elasticidad del hule mientras que decrece su plasticidad.

La figura 2.1 representa la red del compuesto de hule antes y después de la vulcanización. Antes de la vulcanización el compuesto de hule se muestra como una pila o montón de "spaghetti", la cual se mueve o mezcla con mucha facilidad. En contraste, la libertad de movimiento en el hule vulcanizado con azufre se restringe. El número de puntos de unión o enlaces cruzados puede variarse a libre arbitrio dependiendo de los requerimientos del proceso. Mientras más puntos de unión o enlaces cruzados se generen o adiciones, la movilidad del sistema se reduce cada vez más, y el producto es más rígido, con menor flexibilidad y aparentemente más compacto. De acuerdo con esto, las propiedades del hule vulcanizado son, por lo tanto, controlables en una gran extensión, aunque son afectados diferentemente.

La figura 2.2 muestra los cambios en las propiedades del hule vulcanizado bajo los cambios controlados de la densidad o cantidad de puntos de unión o estado vulcanizado. Cada tipo de hule vulcanizado genera su propia gráfica como consecuencia de la interrelación de estas propiedades. El formulista o diseñador del compuesto de hule, por lo tanto, debe ajustar y optimizar el estado de curado para obtener las mejores propiedades para la aplicación específica. Esta labor se complica adicionalmente con el azufre como agente vulcanizante, el cual puede presentarse como polisulfuro, disulfuro o monosulfuro, como se observa en la figura 2.3. Esto también es afectado por el tipo y propiedades físicas del polímero específico o mezcla de polímeros, el tipo y la cantidad de reforzantes o rellenos y la forma física del producto final, entre otros factores.

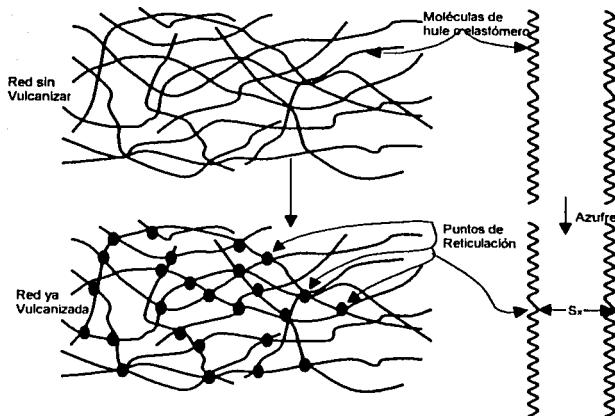


FIGURA 2.1 Formación de la Reticulación durante el proceso de Vulcanización

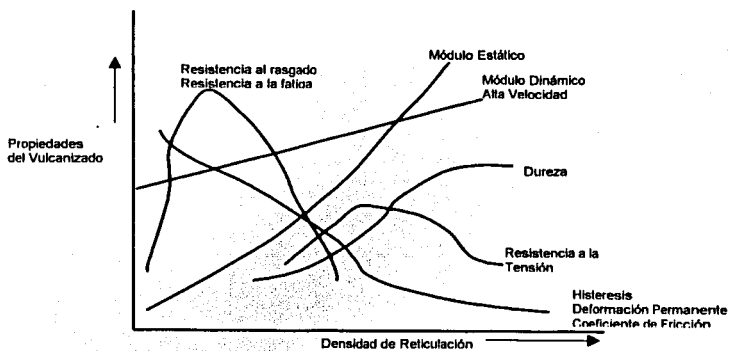
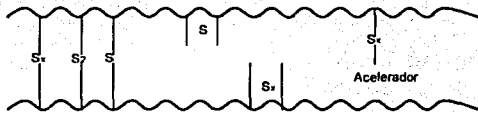


FIGURA 2.2 Efectos del proceso de Vulcanización sobre las propiedades de los Compuestos de Hule

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIGURA 2.3** Estructuras del azufre formadas durante el proceso de Vulcanización de un Elastómero

La vulcanización del hule o sus compuestos, con azufre, es un proceso dinámico en el cual el estado de curado se obtiene calentando el producto a vulcanizar por un espacio de tiempo. Es posible lograr cambios adicionales en el hule después del estado de curado, por medio del recalentamiento del sistema a modificar. Estos cambios pueden partir del estado original de curado y, por lo tanto, todas las propiedades se alterarán. A este proceso se le conoce como reversión, y el formulista debe de tomarlo en cuenta y reconocer que un sistema de curado puede padecerlo, de manera que optimice la elección de los ingredientes con objeto de producir un estado de vulcanizado estable.

**Reversión.-** Reversión es un término generalmente aplicado a la pérdida de redes estructurales que se obtienen en el compuesto de hule al ser vulcanizado. Esta pérdida es por envejecimiento térmico dentro del elastómero. Esto es usualmente asociado con hules a base de isopreno vulcanizados con azufre. Esto puede ser el resultado de un tiempo excesivo de vulcanización (sobrecurado) o de envejecimiento térmico. También es aplicado a otros tipos de degradación no oxidativa, especialmente a hules no basados en el isopreno. Por ejemplo, el envejecimiento térmico del SBR, el cual puede incrementar su densidad de reticulación y dureza.

### 2.6.2.2) OTROS AGENTES VULCANIZANTES

Muchas especialidades de elastómeros de alto desempeño, no contienen un grupo diénico en su estructura molecular, y por lo tanto, no pueden ser curados utilizando el azufre como agente vulcanizante. Estos elastómeros requieren agentes vulcanizantes capaces de reaccionar con el grupo funcional específico contenido en su estructura molecular. Algunos agentes vulcanizantes, diferentes al azufre, son las resinas difuncionales, óxidos metálicos y peróxidos.

**Derivados fenólicos.** Un ejemplo de resinas difuncionales son los derivados fenólicos, empleados para curar o vulcanizar los hules diénicos tales como el NR, SBR, BR, IIR y EPDM, y son usualmente distribuidos por grupos  $-CH_2-X$ , donde X es OH o un halógeno. El mecanismo de reacción de la reticulación implica una reacción de condensación entre cada uno de los dos grupos difuncionales del agente vulcanizante con las cadenas del polímero para formar una red tridimensional. Debido a los enlaces carbono-carbono resultantes, la estabilidad térmica y la resistencia a la deformación permanente son excelentes.

Dos tipos de elastómeros comercialmente importantes y de alto rendimiento denominados fluoroelastómeros y poliácrilatos, no se vulcanizan con azufre. Normalmente se curan con aminas vulcanizantes.

**Óxidos Metálicos.-** Los hules clorobutadieno o cloropreno (CR), también llamados hules neoprénicos, así como el policloropreno y el polietileno clorosulfonado normalmente son vulcanizados por la acción de óxidos metálicos. El agente de reticulación o vulcanizante

regularmente es el óxido de zinc. El óxido metálico reacciona con los grupos halógeno en el polímero para producir un activo intermedio, el cual reacciona adicionalmente para producir enlaces carbono-carbono. El cloruro de zinc se libera como un subproducto y sirve como autocatalizador para esta reacción. El cloruro de zinc puede ser usado en combinación con el óxido de magnesio para controlar la proporción del curado, y minimizar la vulcanización prematura o scorch. El scorch es la vulcanización que sufre el compuesto antes de concluir el proceso de preforma. También se le conoce como el fenómeno de prevulcanización.

**Peróxidos Orgánicos.-** La mayoría de los elastómeros pueden ser vulcanizados por la acción de los peróxidos orgánicos. Los peróxidos son probablemente los materiales más comúnmente usados como agentes vulcanizantes después del azufre, debido a su habilidad para reticular una variedad de elastómeros diénicos y no diénicos, y por su capacidad para producir enlaces carbono-carbono térmicamente estables. Los enlaces carbono-carbono son inherentemente más fuertes que los enlaces carbono-azufre desarrollados por la vulcanización con azufre.

Los peróxidos se descomponen al calentarse, y producen radicales libres activos, los cuales reaccionan con el elastómero para producir la reticulación. La proporción de peróxido que actúa es controlada por la temperatura y la selección del peróxido específico, basado en la vida media. Aunque algunos químicos actúan como coagentes en el curado con peróxido, ellos no son aceleradores de la vulcanización. En cambio sí actúan para mejorar la eficiencia de la reticulación.

### 2.6.3) ACELERADORES

La vulcanización fue descubierta en 1839 al calentar el hule natural con azufre. En 1906 se encontró que la anilina, compuesto orgánico, tenía la habilidad de acelerar la reacción del azufre con el hule natural. Varios derivados de la anilina, pero menos tóxicos que ésta, comenzaron a desarrollarse a partir de entonces, los cuales incrementaban su actividad de aceleración sobre dicha reacción.

Por definición un:

**Acelerador.-** Es una sustancia química que aumenta la velocidad de reacción entre un elastómero o compuesto de hule y un agente vulcanizante o azufre; o en otros casos el efecto que produce es la disminución de la temperatura de vulcanización. Puede disminuir también la cantidad necesaria de azufre para la vulcanización y mejorar considerablemente las propiedades físicas y mecánicas del compuesto vulcanizado. Algunos aceleradores también pueden actuar como agentes vulcanizantes.

Durante la vulcanización del hule con azufre, los aceleradores sirven para controlar el tiempo y la velocidad de la reacción, y el número y tipo de enlaces entrecruzados que se forman (grado y tipo de reticulación). Estos factores juegan un papel significativo sobre el desempeño de las diferentes propiedades del compuesto vulcanizado.

Los aceleradores se clasifican desde dos puntos de vista: químico y funcional.

Químicamente se clasifican en: Aldehído-amina, Guanidinas, Tiazoles, Sulfenimidias, Sulfenamidas, Ditiocarbamatos, Tiuramios y Ditiocarbamatos, y en el mismo orden la velocidad que le infunden a la reacción de vulcanización va de lenta a muy rápida, pasando por media, semirrápida y rápida.



Funcionalmente, los aceleradores se clasifican en primarios y secundarios. Los aceleradores primarios generalmente proporcionan buen tiempo de quemado<sup>1</sup>, velocidades de curado media a altas, y buen desarrollo de propiedades físicas (módulo). Los aceleradores secundarios tienen un tiempo de quemado corto, y velocidad muy rápida de curado. Frecuentemente se usan en combinación con aceleradores primarios, aunque en menor proporción, para modificar las características de los primarios.

Como puede observarse en los párrafos anteriores, hay varios tipos de aceleradores y muchos más que no se clasifican en ninguno de estos. Muchos de éstos son mezclados para diseñar paquetes o sistemas de curado para aplicaciones específicas. Seleccionar el mejor sistema de curado es responsabilidad del técnico en compuestos o formulista y requiere un amplio conocimiento de cada tipo de acelerador y su aplicabilidad a cada elastómero.

Aunque los aceleradores responden de diferente manera de un tipo de elastómero a otro debido a las diferencias inherentes en sus estructuras moleculares, las gráficas de la figura 2.4 sirven como guía de los principales aceleradores y su funcionalidad.

Es práctica común en la industria del hule que el formulista utilice combinaciones de varios aceleradores para desarrollar o diseñar un sistema de curado. Típicamente estos sistemas de curado se componen de un acelerador primario y uno o más aceleradores secundarios.

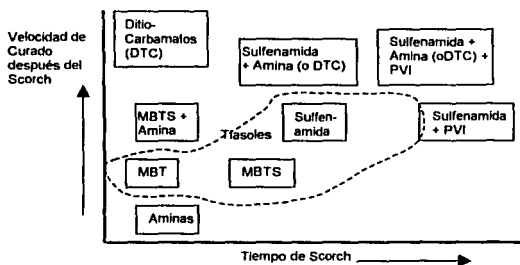


FIGURA 2.4 Características de Vulcanización dadas por varios aceleradores y sus combinaciones

Los aceleradores y los agentes vulcanizantes se combinan para lograr las propiedades en desempeño (performance) del hule vulcanizado.

Hay tres tipos de sistemas de curado, generalmente reconocidas para la vulcanización con azufre, que son: el sistema convencional, el sistema eficiente (EV) y el sistema semieiciente (semi-EV). Estos difieren principalmente en el tipo de azufre que forma la reticulación o enlaces entrecruzados, el cual influye significativamente en las propiedades del vulcanizado. El término eficiente se refiere al número de átomos de azufre por enlace o reticulación, y un factor de eficiencia se ha definido.

Los sistemas de curado convencional utilizan niveles de azufre relativamente altos (2.5+ phr) combinado con niveles bajos de aceleradores. Estos típicamente proporcionan propiedades físicas

<sup>1</sup> Tiempo de Quemado: Representa el tiempo de seguridad del proceso, durante el cual el compuesto de hule permanecerá estable a ciertas condiciones de temperatura. Después de este tiempo el compuesto iniciará la reacción de vulcanización

inicialmente allas, tensión y resistencia a la ruptura, y una buena resistencia inicial a la falga, pero con una mayor tendencia a perder estas propiedades después del envejecimiento térmico.

En contraste, el sistema de curado eficiente (EV) emplea niveles mucho menores de azufre libre (0.1 —1.0) o usan donadores de azufre combinados con niveles altos de aceleradores. La reticulación monosulfurosa o disulfurosa que se forma frecuentemente no muestra las excelentes propiedades físicas del sistema convencional, pero retiene sus propiedades mucho mejor después del envejecimiento.

El sistema semi-EV representa la parte media entre el sistema convencional y el sistema EV; implica el balance entre el envejecimiento térmico y una vida flexible duradera.

#### **2.6.4) ACTIVADORES**

**Los activadores son productos químicos que ayudan a los aceleradores a incrementar la rapidez de la vulcanización en los compuestos de hule. Existen dos tipos de activadores: orgánicos e inorgánicos.**

Los activadores inorgánicos se combinan con los orgánicos y los aceleradores, para formar compuestos complejos que actúan directamente con el agente vulcanizante incrementando la velocidad de la reacción.

Existen varios productos empleados como activadores. El activador inorgánico más empleado es el **óxido de zinc**, y el activador orgánico más empleado es el **ácido esteárico**. Ambos se incluyen en la formulación de un compuesto de hule. Para iniciar la activación el óxido de zinc reacciona con el ácido esteárico dentro del compuesto para formar estearato de zinc, una sal soluble de zinc, la cual a su vez reacciona con el acelerador orgánico para formar un complejo de acelerador-zinc, este complejo reacciona posteriormente con el agente vulcanizante (azufre), incrustándolo donde se encuentren ligaduras libres del elastómero (dobles enlaces), para formar las uniones que inician la vulcanización. Este proceso se repite hasta agotar la gran mayoría de los dobles enlaces del elastómero.

Variando la concentración de óxido de zinc se pueden modificar propiedades tales como la tensión, abrasión, módulo y resistencia al desgarre del producto final en servicio. El tamaño de partícula pequeño del óxido de zinc es más efectivo que el tamaño grande.

La sal de estearato de zinc formada externamente no se usa directamente como activador en un compuesto de hule, ya que no proporciona las mismas características que la sal que se obtiene al reaccionar el óxido de zinc y el ácido esteárico en medio del elastómero.



### 3) FORMULACIÓN O DISEÑO DE UN COMPUESTO DE HULE

### 3) FORMULACIÓN O DISEÑO DE UN COMPUESTO DE HULE

**Definición.-** Es el arte y la ciencia de seleccionar y combinar los elastómeros, cargas, aditivos y demás ingredientes para obtener una mezcla o compuesto que deberá mostrar ciertas propiedades físicas y químicas en el producto final. Se dice que es arte por que, en gran medida, la efectividad del compuesto diseñado depende de la experiencia en esta rama del individuo que lo formula (formulista o técnico en compuestos de hule).

#### 3.1) OBJETIVOS DE LA FORMULACIÓN

Al realizar la formulación de un compuesto de hule, el diseñador o formulista debe satisfacer ciertos objetivos, de los cuales, los más importantes están relacionados con: las **propiedades del producto final, características de procesabilidad del compuesto y costo del mismo**. Cada uno se puede enunciar de la siguiente manera:

- Obtener las propiedades adecuadas en el producto final para satisfacer los requerimientos del servicio al que éste será destinado.
- Garantizar las características de proceso necesarias de acuerdo al compuesto a elaborar, de manera que se haga el uso óptimo y eficiente de los equipos disponibles.
- Conjuntar las propiedades requeridas del producto final y la óptima procesabilidad del compuesto al menor costo posible.

En síntesis, el formulista deberá visualizar que los tres puntos anteriores se mantengan en equilibrio, manteniéndolos siempre como sus guías de acción y reacción.

#### 3.2) CONSIDERACIONES

Para que se puedan cumplir los objetivos de la formulación, antes de realizarla, el diseñador debe responder a varias preguntas de manera que exista una guía concreta para iniciar con esta labor. Algunas de las preguntas que debe responder son:

- ¿En qué medio ambiente va a trabajar el producto final?
  - ♦ Está sometida a temperatura
  - ♦ Está sometida a luz solar y ozono
  - ♦ Está en contacto con solventes, ácidos o aceites
- ¿Qué propiedades físicas requiere?
  - ♦ Dureza
  - ♦ Elasticidad
  - ♦ Módulo y Tensión
  - ♦ Desgarre
- ¿Qué propiedades de proceso requiere?
  - ♦ Facilidad de flujo

- ◆ Adhesión (Tack)
- ◆ Pegajosidad (Stick)
- ◆ Tiempo de Quemado (Scorch)
- ¿Cuál es su parámetro de funcionalidad?
  - ◆ Son sus propiedades físicas
  - ◆ Es su costo
  - ◆ Es su disponibilidad
- Así mismo, también tiene que preguntarse qué otras regulaciones tiene que cumplir, tales como normas o regulaciones ambientales, incluso toxicológicas.
- Otra consideración de importancia que el formulista debe de tomar en cuenta es el cambio de propiedades que experimentará el compuesto durante la etapa de vulcanización.

La vulcanización, ya sea con azufre o con un agente vulcanizante diferente, es una reacción compleja durante la cual, tanto el número (densidad) y el tipo (estructura) de enlaces cruzados o reticulación, están continuamente cambiando conforme dicha reacción avanza. La estructura química formada en un tiempo dado durante el curado puede favorecer una serie de propiedades tal como la resistencia al rasgado mientras que no será óptima para otras tal como la histéresis. Un sistema de curado diseñado para minimizar estos inconvenientes es siempre el objetivo del formulista.

El efecto, tanto de la densidad como de la estructura de la reticulación, sobre las propiedades físicas más comunes se resumen en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1. Efecto del Incremento del Número y Longitud de Enlaces Cruzados**

Propiedad	Número	Longitud
Resistencia a la tensión	> , entonces <	>
Elongación.	<	
Módulo	>	
Flexibilidad	<	>
Compression Set	<	>
Histéresis	<	>
Resiliencia	>	<
Estabilidad Térmica		<
Estabilidad a la Oxidación		<
Resistencia al rodamiento	<	
Resistencia al Desgarre	> , entonces <	>
Abrasión	>	>

Estas tendencias pueden explicarse de la siguiente manera. El módulo o rigidez se incrementa con el número de enlaces en la reticulación, debido a la estructura tridimensional que se forma, y que lo vuelve más resistente a la deformación bajo una carga, y por lo tanto, requiere una fuerza mayor para alcanzar una elongación dada. Con el sobrecurado, la estructura reticulada tiende hacia los extremos; es decir, o se degrada y hay una caída en el módulo (es el caso del hule natural), o continúa incrementándose y fortaleciéndose (como en el caso del SBR y polibutadieno).

La tensión y la resistencia al rasgado y a la fatiga, frecuentemente pasan por un máximo conforme el curado progresa. Esto es, primero se intensifican y después se reducen. Éstas últimas son altamente dependientes de la presencia de grietas o zonas agrietadas en el material. Conforme el curado avanza y el módulo se fortalece, si alguna carga aplicada actúa sobre una grieta (desde una mala dispersión, pequeños cortes o rasgados, etc) concentra la tensión en la grieta y proporciona un mecanismo para que exista una falla durante la tensión y una propagación del rasgado o mala resistencia a la fatiga.

Las propiedades de deformación permanente e histéresis se reducen con el incremento de la reticulación. Éstas dependen de minimizar el componente viscoso o plástico del módulo. La histéresis es una medida de la energía de deformación que no se almacena, pero que es convertida en calor. Debido a que la reticulación incrementa la elasticidad, un estado alto de curado generalmente proporciona buenas propiedades de compresión y aumento de calor.

La resistencia al calor es influenciada tanto por el tipo como por la duración del curado. Mientras mayor sea el vigor o fuerza entre los enlaces químicos en la reticulación, el compuesto tendrá mejor resistencia al calor. Los sistemas de curado con peróxidos, que resultan en enlaces carbono-carbono, equivalen a la reticulación con azufre a un rango que varía de 1 a 30 átomos de azufre por punto de unión, y la resistencia al calor mejora conforme el número de enlaces cortos, térmicamente estables, predomina. Este es un factor importante al diseñar un sistema de curado.

Algunas propiedades no son significativamente dependientes de la reticulación, y permanecen casi invariables conforme el curado avanza. Éstas incluyen la conductividad térmica, las propiedades eléctricas y la temperatura de transición vítrea (o cristalización).

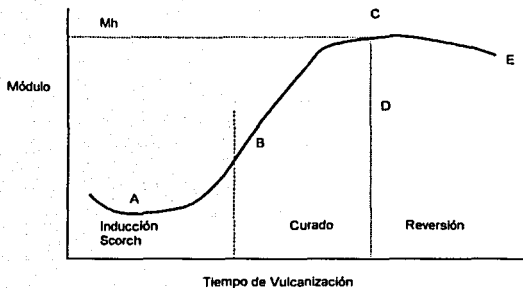
Otra consideración del sistema de curado es la resistencia del compuesto al fenómeno de la vulcanización prematura (scorch). Antes de la vulcanización, el compuesto de hule es similar a un plástico, es decir, puede procesarse y configurarse en las formas deseadas, tales como llantas, mangueras, bandas, cámaras para llantas, y otros artículos. El tiempo disponible para realizar este proceso o configuración depende grandemente del sistema de curado y se le refiere como el tiempo de scorch o tiempo de seguridad. Si el compuesto cura prematuramente durante la etapa del proceso, normalmente se convierte en un material inútil, o con muy pocas probabilidades de utilizarse en forma normal. Por lo tanto, un requerimiento clave durante la etapa de configuración o preforma es minimizar la vulcanización prematura o scorch. Ver figura 3.1.

Los efectos de la vulcanización sobre las propiedades relacionadas al uso de los compuestos de hule se ilustran en la idealización de la figura 3.2. Estas propiedades no son funciones únicamente de la densidad y tipo de la reticulación, sino que también son afectadas por el tipo de polímero o polímeros que integran el compuesto, las cargas y otros aditivos.

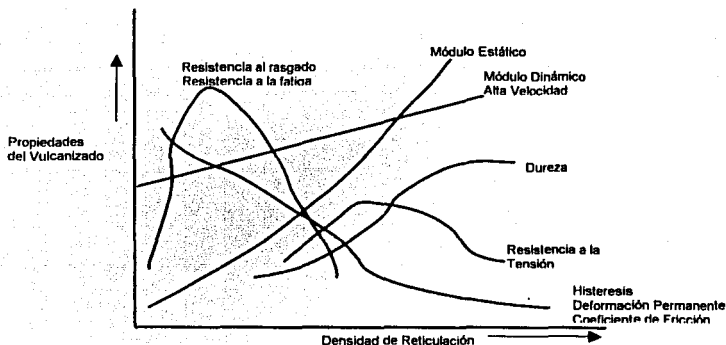
La vulcanización es un proceso químico mediante el cual se logra mejorar el desempeño y las propiedades de los compuestos a base de elastómeros o compuestos de hule. Sin embargo, en muchos casos no todas las propiedades deseadas alcanzan sus niveles óptimos simultáneamente. Una de las responsabilidades clave del diseñador de compuestos de hule, o formulista, es alcanzar un balance entre las propiedades más importantes por la apropiada selección del sistema de curado (químico) y el ciclo tiempo-temperatura (físico).

Frecuentemente, el equipo de curado disponible, por ejemplo, prensas, autoclaves, etc., no permiten variar las condiciones de curado tanto como se requieran, de modo que el formulista o técnico en compuestos debe diseñar un sistema de curado compatible con el equipo existente, a la vez que alcanza el desempeño requerido de los compuestos.

Los artículos de hule útiles, tal como llantas y accesorios mecánicos, no pueden ser fabricados sin la vulcanización. El hule no vulcanizado no es fuerte, no mantiene su forma después de una gran deformación y puede ser muy pegajoso; tiene una consistencia similar a la goma de mascar.



**FIGURA 3.1** Curva de curado obtenida del oscilador conocido como Rehometro A representa la seguridad del proceso o Scorch; B la velocidad del curado; C el estado de curado, D tiempo óptimo de curado, y E el punto de reversión.



**FIGURA 3.2** Efectos del proceso de Vulcanización sobre las propiedades de los Compuestos de Hule

### 3.3) FORMULACIÓN DE COMPUESTOS DE HULE

Como se vió en el capítulo 2 "INGREDIENTES O COMPONENTES", los compuestos de hule están formados por:

- Elastómeros o Polímero base
- Cargas: Reforzantes y No reforzantes
- Plastificantes
- Aditivos: Modificadores y Protectores
- Ayudas de Proceso
- Sistemas de Vulcanización: Activadores, Aceleradores y Agentes Vulcanizantes

Cada uno de éstos fue analizado en dicho capítulo. Ahora se presentarán algunas fórmulas básicas de manera que se entienda la manera y algunas proporciones básicas en que se combinan.

En éste reporte no se presenta una formulación para cada elastómero base debido a que puede existir un número considerable de ellas, y depende principalmente del uso que se dará al producto final. Se presentan únicamente algunas fórmulas generales que pueden emplearse como base o guía.

En la práctica, una fórmula es usualmente aquella que contiene 10 o más ingredientes. A continuación se presenta una fórmula con los ingredientes básicos. Las cantidades de los ingredientes de un compuesto de hule se refieren a 100 partes de hule (phr).

#### FÓRMULA BÁSICA DE UN COMPUESTO DE HULE

%	Tipo de Ingrediente	PHR
53.3	Elastómero	100
29.3	Cargas	50
10.7	Plastificante	20
1.6	Antiozonante (Aditivo Protector)	3
0.5	Antioxidante (Aditivo Protector)	1
2.6	Activadores	5
0.9	Aceleradores	1.7
1.1	Agente Vulcanizante	2
100.0	TOTAL	182.7



En la fórmula anterior se mencionan los ingredientes básicos, sin que estos sean necesariamente los únicos. Se puede incluir en ella ayudas de proceso, pigmentos de color y algunos otros aditivos especiales.

A continuación se ejemplifican las formulaciones típicas a base de hule natural y hule sintético.

#### FORMULACIÓN PARA HULE NATURAL O SINTÉTICO

Ingrediente	PHR	PHR
Hule Natural (Elastómero)	100.0	0.0
Hule Sintético (Elastómero)	0.0	100.0
Carga	50.0	70.0
Plastificante	15.0	10.0
Ayuda de Proceso	5.0	5.0
Antioxidante (Aditivo Protector)	2.0	1.5
Antiozonante (Aditivo Protector)	2.0	1.5
Activador	8.0	8.0
Acelerador	2.0	1.3
Agente Vulcanizante	3.0	1.8
TOTAL	187	199.1

Estos datos pueden considerarse como promedio, y pueden presentar diferencias en la práctica. Sin embargo, pueden servir como una guía para la formulación o diseño de algún compuesto.

Debe tomarse en consideración que el aumento o disminución de la proporción de algún ingrediente en particular afectará las propiedades del compuesto. Por lo tanto, debe conocerse muy bien el efecto de cada ingrediente en la formulación, y por ende, en las propiedades del compuesto; propiedades que pueden ser de procesabilidad o de servicio del producto final.

## PARTE II

# OPERACIONES UNITARIAS EN LA INDUSTRIA HULERA

---



# 1) INTRODUCCIÓN

## **PARTE II OPERACIONES UNITARIAS EN LA INDUSTRIA HULERA**

### **1) INTRODUCCIÓN**

Dentro de la industria hulera, existen diversos procesos mediante los cuales se obtienen los productos demandados por el mercado, sean como producto final o materia prima para la fabricación de artículos más elaborados. Tomando como base los fundamentos de la Ingeniería Química y haciendo una analogía con la misma, estos procesos pueden considerarse como las operaciones unitarias dentro de la industria hulera, debido a que constituyen la base de la mayoría de las actividades productivas de ésta rama.

Dichas operaciones pueden presentar variantes de una empresa a otra, o de la elaboración de un producto a otro; o incluso, en la misma empresa y para la elaboración del mismo tipo de producto, pero con características o propiedades diferentes, el mismo proceso presenta diferencias.

Aún con las diferencias que se pudieran encontrar para una misma operación, el fundamento empleado y los objetivos que se persiguen, esencialmente son los mismos.

Las operaciones o procesos que pueden considerarse como las operaciones unitarias dentro de la industria hulera son las siguientes:

- 1) Mezclado
- 2) Extrusión
- 3) Calandrado
- 4) Vulcanización

Estas operaciones generalmente están ligadas en forma de etapas subsecuentes, aunque no necesariamente en el orden expuesto en la lista anterior; o incluso, puede no emplearse alguna de ellas si no es necesario para el producto que se esté fabricando.

Existen otras operaciones en la industria hulera que se emplean con menor frecuencia en la cadena de fabricación de un producto de hule. Entre ellas se encuentran el moldeado y el corte o preforma, las cuales no se discuten en este trabajo.

Cada una de las operaciones unitarias, aplicadas en la fabricación de compuestos y artículos de hule, mencionadas en el párrafo anterior presentan una serie de fenómenos fisicoquímicos mediante los cuales se verifican la conversión y la transformación de los ingredientes del compuesto de hule, de manera que se logren las propiedades físicas, químicas y mecánicas necesarias en el producto final para el desempeño de sus funciones. Algunos de estos fenómenos se presentarán en los siguientes capítulos de este trabajo, al exponer algunos de los principios teóricos que sustentan cada operación unitaria en particular, con el fin de entender con la mejor claridad posible lo que ocurre en cada una de ellas, y el efecto que provocan sobre las características o propiedades del producto final los cambios que pueden darse en alguna de ellas.



## 2) OPERACIÓN DE MEZCLADO

## 2) OPERACIÓN DE MEZCLADO

La fabricación de los productos de hule inicia siempre con la preparación del compuesto o los compuestos que se utilizarán para su elaboración. Para esta etapa se emplea la operación de Mezclado.

La operación de mezclado es el primer proceso que compone la serie de procesos empleados para la fabricación de artículos de hule. Es la operación que permite obtener la materia prima adecuada para el artículo que se pretende fabricar.

La **operación de mezclado consiste en formar una mezcla o compuesto homogéneo**, después de poner en contacto íntimo y de incorporar entre sí una serie de ingredientes, de los cuales se da una explicación en la primera parte de éste trabajo.

El **objetivo del proceso de mezclado es producir un compuesto con todos sus ingredientes totalmente incorporados en el seno del mismo**, de manera que su procesamiento en **operaciones** subsiguientes sea adecuado y eficiente, y que el producto final cumpla con las propiedades requeridas en el servicio para el cual será destinado.

El proceso de mezclado, además de permitir la incorporación de diversos ingredientes o aditivos al elastómero, sirve también para modificar la forma física del mismo, de manera que se maneje con mayor facilidad en etapas posteriores de su transformación.

### 2.1) TIPOS DE MEZCLADO

En el trabajo con polímeros, principalmente se reconocen dos formas o procedimientos para realizar el mezclado. El objetivo de cada una es obtener una mezcla de ingredientes. La primera se conoce como Mezcla Extensiva, Distributiva o de Homogeneización y la segunda como Mezcla Intensiva, Dispersiva o Formación de Compuestos. A continuación se explica cada una de ellas.

#### 2.1.1) MEZCLA EXTENSIVA, DISTRIBUTIVA Y HOMOGENEIZACIÓN

La mezcla distributiva consiste básicamente en revolver y distribuir todos los ingredientes de una mezcla mediante el mezclado simple, esto significa combinar una cantidad de sólidos (ver definición de Distribución sección 2.2.4). El resultado es una mezcla de polvos distribuidos entre sí; los polvos originales permanecen sin cambio físico y, en teoría, pueden separarse. Pueden agregarse pequeñas porciones de líquidos; estos se adsorberán por los ingredientes sólidos. **Este procedimiento se usa principalmente cuando se trabaja con polímeros termoplásticos, por ejemplo, pinturas, plásticos, etc.**, lo que no será discutido aquí por no ser el objetivo del trabajo.

#### 2.1.2) MEZCLA INTENSIVA, DISPERSIVA O FORMACIÓN DE COMPUESTOS

Al igual que la mezcla homogénea, la mezcla intensiva consiste en combinar y poner en contacto íntimo una serie de ingredientes que nos permitirán obtener un compuesto. A diferencia

de la mezcla homogénea que se emplea para compuestos en donde el polímero base es termoplástico, la mezcla intensiva se emplea para obtener compuestos en donde el polímero base es termofijo, específicamente, en donde el polímero base es un elastómero.

Con la mezcla intensiva o de formación de compuestos se logra la mejor dispersión de los aditivos en el seno del polímero (ver definición de Dispersión sección 2.2.3). Para lograr esto se requiere:

- Un cambio físico en los componentes;
- Altas fuerzas cortantes para provocar el cambio;
- Que el polímero esté en el estado fundido o en estado gomoso para mezclarlo.

Cuando se usan aditivos, es importante efectuar una dispersión y una distribución casi perfectas.

Como se muestra en la figura 2.1:

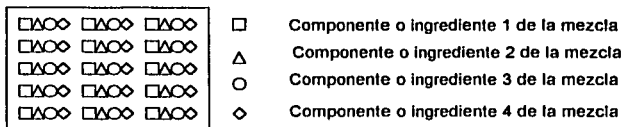


FIGURA 2.1 Mezcla Dispersiva

Se observa como los diferentes ingredientes de la mezcla se encuentran perfectamente "dispersos" en el seno de ésta, cumpliéndose así el objetivo de la mezcla dispersiva.

La formación de compuestos o mezcla dispersiva es necesaria como un proceso individual:

- Cuando se requiere distribución precisa y dispersión de los ingredientes interactivos, donde varios tipos de aditivos tienen que actuar juntos para facilitar una operación;
- Cuando se usan grandes cantidades de ingredientes modificadores;
- Cuando el proceso de fabricación tiene una función de formación de compuestos insuficiente o escasa.

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, para obtener un compuesto de hule se recurre al tipo de mezclado intensivo, dispersivo, o de formación de compuestos; pero debe tenerse en cuenta la importancia del mezclado distributivo. Por lo tanto, para que una mezcla esté bien realizada, sus componentes deben estar bien distribuidos y bien dispersos dentro de ésta.

## 2.2) FENÓMENOS FÍSICOQUÍMICOS EN EL MEZCLADO INTENSIVO

Durante la operación de mezclado intensivo o dispersivo, se verifica una serie de fenómenos físicoquímicos que permiten que todos los ingredientes entren en íntimo contacto.

Estos fenómenos son:

- 1) Masticado y Plastificación
- 2) Incorporación
- 3) Dispersión
- 4) Distribución
- 5) Calentamiento
- 6) Flujo

A continuación se expondrá en qué consiste cada uno de estos fenómenos, donde, además de dar la definición de cada uno de ellos, se explicará su efecto sobre los ingredientes del compuesto o del compuesto mismo durante la operación de mezclado.

### 2.2.1) MASTICADO Y PLASTIFICACIÓN

**Plastificación:** Es el proceso o tratamiento mediante el cual un elastómero o compuesto de hule alcanza las condiciones y características de deformación y flujo necesarias para su procesamiento. En otras palabras, es el tratamiento del elastómero para reblandecerlo o suavizarlo, de manera que sea fácil deformarlo y que pueda fluir al aplicarle un esfuerzo. Se dice que un material es plástico por que se puede modificar su forma, es decir, se puede deformar. Técnicamente, la plastificación es la modificación de las propiedades reológicas del elastómero o compuesto de hule para acondicionarlo a las operaciones o procesos subsiguientes.

La primera operación activa que sufre el elastómero al someterlo al proceso de fabricación es la plastificación. Esta se efectúa siempre en forma mecánica, combinada con algún otro método, y que puede ser: aplicación de calor, acción química del oxígeno, adición de ablandadores, plastificantes o agentes peptizantes.

El proceso o tratamiento mecánico de plastificación de un elastómero se le conoce como **masticado** o **masticación**, que consiste en hacer pasar el elastómero a través del espacio que existe entre dos rodillos de un molino abierto, o a través del espacio que existe entre los rotores de un mezclador interno, de manera que se reblandezca.

El mecanismo de la **masticación** del elastómero sobre un molino o dentro de un mezclador interno es complejo. Físicamente lo que se observa cuando el elastómero pasa por el espacio que existe entre los dos cilindros o rotores, es un desgarre y desmenuamiento del mismo, queda cortado en trozos pequeños con las secciones internas al descubierto; experimenta una descompactación y desintegración, produciendo material pequeño. Esto es acompañado por generación de calor dentro del elastómero. Todo esto ocurre causado por los esfuerzos cortantes y de fricción de gran magnitud que el par de rotores del mezclador o cilindros del molino efectúan sobre el elastómero al girar a diferente velocidad y en sentido contrario uno con respecto al otro.

El resultado de esta operación es un material extendido y poroso, con un área superficial mucho mayor que el bloque o paca original de elastómero; además, caliente y reblandecido. Esto nos lleva a establecer que los objetivos de la **masticación** del elastómero son los siguientes:



- 1) Descompactar la paca o bloque inicial y aumentar el área superficial para facilitar la incorporación posterior de los aditivos modificadores y protectores (aplicación de esfuerzos cortantes y de fricción).
- 2) Reblandecer y disminuir su viscosidad para facilitar su procesado posterior (aplicación de esfuerzos cortantes y de fricción promoviendo la generación interna de calor).

Desde el primer momento en que un elastómero se somete al proceso de masticación, sufre una despolimerización, pero esta acción no es independiente, es activada por el calor, sea éste de aplicación o de formación interna durante el proceso. En la práctica normal, la acción del calor es complementada por la del oxígeno, pues la masticación se efectúa en contacto con el aire.

La acción del oxígeno consiste en romper la cadena carbonada de la macromolécula del elastómero, en cadenas carbonadas más cortas; por lo tanto, el oxígeno tiene una fuerte acción plastificante.

Las macromoléculas son las que dan lugar al nervio del elastómero.

Las acciones del oxígeno han sido sintetizadas de la siguiente forma:

- a) Los efectos del reblandecimiento o plastificación se deben a la acción del oxígeno al romper las largas cadenas carbonadas de las macromoléculas, dando otras de cadena corta.
- b) La mejora del nervio sugiere siempre la existencia de alguna macromolécula, cuya cadena ha sufrido rotura al menos en parte.

El elastómero masticado es de más difícil envejecimiento que el elastómero sin masticar. El punto de reblandecimiento del elastómero varía según la temperatura, tiempo de masticación, tiempo de abrasión, calor y presencia de oxígeno.

Los factores que influyen en la **plastificación** del elastómero, además de lo comentados del calor y oxígeno, son los siguientes:

- a) Tiempo de masticación.
- b) Potencia consumida.
- c) Peso total del elastómero.
- d) Paso entre los cilindros masticadores si el equipo empleado es un molino, o rotores si el equipo empleado es un mezclador interno.
- e) Velocidad periférica de los cilindros o rotores.
- f) Relación de fricción entre los cilindros o rotores (relación de velocidades).
- g) Diámetro de los cilindros o rotores.
- h) Tiempo y temperatura después de la masticación.
- i) Personal que efectúa las operaciones.

Aunque el objetivo de los métodos o tratamientos para la plastificación de un elastómero (ruptura mecánica de las cadenas moleculares, oxidación y adición de energía térmica) es el mismo: reblandecimiento y reducción del tamaño molecular; los productos finales de estos métodos, no necesariamente poseen las mismas estructuras moleculares.

Los diversos procedimientos de plastificación dan lugar a diferentes propiedades reológicas. Así, para algunos elastómeros, la plastificación mecánica (es decir, el molino o mezclador en frío) da lugar a productos con el mínimo de recuperación elástica; mientras que la plastificación térmica

o reblandecimiento por oxidación de esos mismos elastómeros dan lugar a productos con un mayor grado de recuperación elástica.

La descripción anterior se refiere a los elastómeros sin cargas de refuerzo o de polvos reforzantes. El comportamiento de las mezclas con cargas de refuerzo es semejante en cuanto a sus fundamentos, pero con una complicación adicional importante, o sea que la naturaleza tixotrópica se vuelve de importancia en las mezclas que contienen cargas de refuerzo, como es el caso del negro de humo

## 2.2.2) INCORPORACIÓN

La operación de mezclado consiste de tres procesos simultáneos, conocidos como *mezclado simple*, *mezclado laminar* y *mezclado dispersivo*. La importancia relativa de cada uno depende de la formulación particular del compuesto (en términos de la atracción entre las partículas de aditivos sólidos y las propiedades de flujo del elastómero), la geometría del mezclador y las condiciones de operación. En algún caso específico, alguno de los tres puede ser el que determine la eficiencia del proceso.

El *mezclado simple* u homogeneización implica el movimiento de una partícula desde un punto a otro, sin cambio en su forma física. Esto implica un incremento en la aleatoriedad o entropía y es también llamado *mezclado extensivo*, como se vió en el apartado 2.1. Cuando los esfuerzos cortantes son lo suficientemente altos como para fracturar las partículas de los aditivos, se presenta el *mezclado dispersivo*; lo que a su vez producirá el flujo del polímero, dando lugar al *mezclado laminar*.

Existen cuatro cambios físicos, desde el punto de vista de los ingredientes en la mezcla, que ocurren durante el ciclo o proceso de mezclado. Uno de ellos ya se comentó en el apartado anterior, y que se le conoce como *plastificación*. En este apartado se explicará un segundo cambio físico, y que es conocido como *incorporación*.

**Incórpóraci6n:** Al inicio del ciclo de mezclado, se fuerza al elast6mero a pasar a trav6s del 6rea de trabajo entre el par de rotores y entre el par de rotores y la pared de la c6mara de mezclado, de modo que la paca original es destruida o desintegrada en trozos m6s peque1os (masticaci6n). La etapa de *incórpóraci6n* ocurre cuando, los ingredientes inicialmente libres, se adhieren o se enlazan al elast6mero. Esta tambi6n es conocida como la etapa de la *humectaci6n*, y tiene dos mecanismos. En el primero, el elast6mero es sometido a una gran deformaci6n (desmenzamiento y desintegraci6n), incrementando su 6rea superficial para aceptar los aglomerados de los aditivos y cargas reforzantes, y atraparlos o absorberlos. En el segundo, el elast6mero se rompe o separa en piezas peque1as y se mezcla con la carga de refuerzo para sellarlos o atraparlos en su interior. El primer mecanismo se observa f6cilmente en un molino abierto. El segundo no es necesariamente observable, debido a que los rompimientos, absorciones y atrapamientos ocurren a nivel micro.

## 2.2.3) DISPERSIÓN

Un tercer cambio físico que ocurre en el ciclo de mezclado es conocido como **dispersión**. Dispersión: consiste en la división o desintegración gradual de los aglomerados de partículas de la carga o cargas reforzantes, y demás aditivos (reducción de tamaño), los cuales, una vez separados, se distribuyen en todo el cuerpo del elastómero (por el mecanismo de mezclado simple). Esta división o separación de los aglomerados de partículas debe de efectuarse hasta el mínimo tamaño posible para dar lugar a un mezclado de muy buena apariencia: Esto es especialmente importante en el caso del negro de humo como carga reforzante, debido a que en esta etapa el contacto íntimo entre las superficies del elastómero y del negro de humo da como resultado cierto enlace o unión química. Por lo tanto, a mayor reducción de tamaño de los agregados de carga reforzante, mayor contacto con el elastómero, mejor enlace o unión química entre ambos.

Tanto la ruptura o separación de los agregados de partículas de la carga reforzante, como el forzamiento del elastómero a entrar en contacto con las superficies de la carga reforzante, requieren altos esfuerzos de corte. Sin embargo, no todos los esfuerzos cortantes provienen del área cortante, debido a que los campos de esfuerzos microscópicos también son generados a partir de la deformación elongacional de los ingredientes.

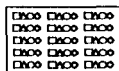
Físicamente se puede comprobar que se haya realizado una buena dispersión de la carga reforzante en el seno del elastómero. Una forma de proceder es como sigue: concluido el ciclo de mezclado, y si la temperatura y la forma del producto lo permite, se debe cortar un trozo del mismo (entre 5 y 7 cm de largo y/o ancho), recorrerlo de extremo a extremo con un dedo de manera que este se impregne del material presente o sin incorporar en el elastómero si es que lo hubiera, observar y tocar el dedo empleado. Si se observan o perciben partículas de polvo, o si el color del dedo se torna del color de la carga reforzante (oscuro en el caso del negro de humo), se puede interpretar que la dispersión no fue buena. En caso contrario, si el dedo está limpio, puede interpretarse que la dispersión fue muy buena.

## 2.2.4) DISTRIBUCIÓN

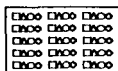
El cuarto y último cambio físico, desde el punto de vista de los ingredientes en la mezcla, que ocurre durante el ciclo de mezclado es la **distribución**. Este proceso que ayuda a mejorar la homogeneización de la mezcla o compuesto, toma lugar durante todo el ciclo de mezclado.

Desde mi punto de vista personal, **distribución** es el reparto equitativo y proporcionado de los ingredientes del compuesto en todo la mezcla o carga; de manera que la presencia de estos ingredientes, en una muestra tomada al azar en la mezcla, sea razonablemente igual o similar en proporciones, para los mismos ingredientes, a otra muestra tomada igualmente al azar de la misma carga; interpretando o validando este resultado como exactamente igual en cualquier sección que se tome como muestra, siempre y cuando se trate de la misma mezcla o carga.

Esto se aprecia mejor en el siguiente diagrama.



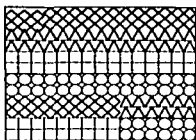
Muestra 1



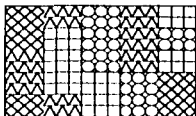
Muestra 2

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

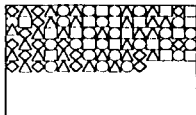
Ahora que se conocen los fenómenos de dispersión y distribución, puede hacerse el siguiente análisis de las diferentes etapas del mezclado, tanto distributivo o de homogeneización, como dispersivo o de formación de compuestos.



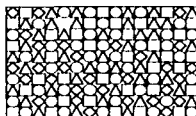
**Etapa 1:** Como se observa en este esquema, en la etapa inicial del mezclado, los componentes se encuentran totalmente aislados unos de otros, aún no existe el contacto entre ellos. Por lo tanto, deben ponerse en contacto para comenzar el mezclado. Se dice que en ésta etapa hay **mala distribución y mala dispersión.**



**Etapa 2:** Los componentes han entrado en contacto, pero forman aglomerados unos con otros y en áreas relativamente aisladas. Por lo tanto, se requiere mejorar la dispersión y la distribución. Se dice que en ésta etapa comienza a darse una **buena distribución, pero persiste la mala dispersión.**



**Etapa 3:** Los componentes, por el mismo avance del proceso, ya no forman aglomerados, la dispersión ha mejorado aunque en una sola área. Por lo tanto, ahora lo que se requiere es mejorar la distribución. Se dice que en ésta etapa hay **buena dispersión, pero existe una mala distribución.**



**Etapa 4:** Conforme se acerque el punto final de la mezcla los componentes ya habrán tenido un buen contacto entre sí. Se habrán dispersado y distribuido en todo el seno del polímero. Por lo tanto, el objetivo del proceso de mezclado se habrá alcanzado. Se dice que en el punto final deberá haber **buena distribución y buena dispersión.**

## 2.2.5) CALENTAMIENTO

Como se ha comentado en los apartados anteriores, y especialmente en el de masticación y plastificación, los compuestos de hule se preparan en equipos que realizan sobre él y el elastómero base, esfuerzos cortantes de gran magnitud, debido a la compactación y dureza que presentan por sí mismos. Estos equipos pueden ser: un molino de dos rodillos o un mezclador interno.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Una de las características de las mezclas hechas bajo condiciones de alto esfuerzo cortante (y es una peculiaridad de los fluidos no newtonianos) es el calentamiento que experimentan por disipación viscosa de la energía. Esto significa que todo el esfuerzo aplicado o trabajo realizado sobre el elastómero o compuesto de hule, terminará transformándose o disipándose en energía térmica (calor), dentro del mismo y sobre las superficies que tengan contacto con él, por ejemplo rodillos del molino, rotores y paredes del mezclador, etc. Este calor es útil para el reblandecimiento del elastómero antes de la introducción de las cargas reforzantes y de otros aditivos.

Para los elastómeros es necesario limitar la elevación de temperatura resultante del calentamiento por disipación viscosa, por dos razones que se consideran importantes:

- 1) Para evitar la formación prematura de enlaces transversales dentro del compuesto, conocido como "prevulcanización", y que es causa posible de contaminación a través de todo el proceso cuando se revuelve con material que no presenta esta característica. Por lo general, el material que presenta esta característica es considerado como defectuoso y muy pocas veces se puede recuperar en un tratamiento posterior aparte para su incorporación al proceso en línea, y esta posible recuperación estará supeditada al proceso en el cual sea empleado. Esta "prevulcanización" se presenta cuando el compuesto ya contiene agentes aceleradores y de vulcanización, y no antes.
- 2) Para mantener una buena mezcla de alto esfuerzo y de mayor eficiencia. Cuando el calentamiento del elastómero es excesivo se vuelve demasiado blando; por lo tanto, el esfuerzo cortante que efectúan sobre él los rodillos de un molino o rotores de un mezclador se reduce y el efecto de mezcla dispersiva se minimiza; lo que se traduce en una mala dispersión y mezclado deficiente. Naturalmente, esto también da productos de mezclado defectuosos, y para recuperarlos requieren de un tratamiento posterior.

Por estas razones los equipos empleados para preparar los compuestos de hule normalmente trabajan con enfriamiento por agua y no con calentamiento.

## 2.2.6) FLUJO

El flujo de materiales que se verifica al trabajar con elastómeros o compuestos de hule, es un fenómeno complicado. No está dentro de los objetivos de este trabajo analizar a fondo dicho fenómeno. Hay una rama científica que estudia el comportamiento de los materiales cuando presentan condiciones de flujo llamada Reología. Sin embargo, a continuación se exponen algunos puntos sobre el tema a manera de introducción general.

Reología es, por definición, la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. El comportamiento reológico de los polímeros, incluido los elastómeros, implica varios fenómenos diferentes, los cuales pueden ser asociados a algunos mecanismos moleculares, los cuales son:

- a) *Flujo Viscoso*. - Es la deformación irreversible del material polimérico total, asociado con el deslizamiento irreversible de las cadenas moleculares una sobre otra. (Desplazamiento).
- b) *Elasticidad*. - Se interpreta como la retención del movimiento en pequeña escala de segmentos de cadenas; pero el movimiento en gran escala (flujo) se previene por la restricción de una estructura difusa.
- c) *Viscoelasticidad*. - Es cuando la deformación del espécimen es reversible pero dependiente del tiempo, y asociado (como en la elasticidad) con la distorsión de las

cadenas del polímero desde su conformación de equilibrio, y con movimiento alrededor de los enlaces químicos.

- d) *Elasticidad de Hook*.- Es cuando el movimiento de las cadenas es drásticamente restringido, y probablemente implique solamente un ligero estrechamiento y deformación del ángulo del enlace: el material presenta un comportamiento similar a un cristal.

A continuación se mencionan algunas propiedades reológicas de los elastómeros y de los compuestos de hule sin vulcanizar, a manera de fundamento para las descripciones sobre los procesos particulares.

- 1) Los elastómeros, así como los compuestos de hule sin vulcanizar, son fundamentalmente fluidos no newtonianos, esto es, no se comportan conforme a la ley de Newton.
- 2) La velocidad de flujo para un esfuerzo determinado depende del tiempo, es decir, el elastómero o compuesto de hule muestra el fenómeno de tixotropía, y este efecto es considerable en los compuestos que contienen cargas de relleno para el reforzado, tal como el negro de humo.
- 3) Todos los elastómeros y compuestos de hule muestran un mayor o menor grado de recuperación elástica cuando el esfuerzo de deformación se elimina.

Los puntos anteriores a cerca de las características reológicas de los elastómeros y de los compuestos de hule sin vulcanizar, se han indicado necesariamente en términos generales, ya que dichas características difieren de un tipo de elastómero a otro, y pueden cambiar de manera considerable por los tratamientos de plastificación.

Desde hace tiempo se ha considerado como idea atractiva el hecho de que, mediante la selección cuidadosa de las condiciones de plastificación, se pueden proporcionar al elastómero o compuesto de hule, al menos hasta cierto punto, las características reológicas más adecuadas para las operaciones de cierto proceso particular. Esta idea es sólo una hipótesis, y aunque han habido trabajos de investigación al respecto, los resultados obtenidos no lo han demostrado en forma contundente.

Durante toda la etapa de mezclado el fenómeno de flujo se presenta. Dentro del mezclador interno, por ejemplo, el movimiento circular de los rotores inducirá un desplazamiento longitudinal sobre los mismos a la masa que se está formando, por la forma física de éstos similar a una pala. Aunque la trayectoria o distancia que la masa recorrerá es relativamente corta porque únicamente va de un extremo a otro de los rotores en el interior de la cámara de mezclado, este movimiento se considera un flujo ya que existe desplazamiento desde un punto a otro (flujo viscoso) y es cíclico, es decir, cuando la masa llega a uno de los extremos de los rotores, por la fuerza del empuje promovido por los mismos y por la fuerza de oposición que presenta la pared de la cámara de mezclado, dicha masa retorna e inicia su recorrido hacia el extremo contrario en donde ocurrirá exactamente lo mismo. Esto se repetirá hasta que la mezcla alcance el punto de descarga y salga del mezclador. Este movimiento constituye el mezclado laminar que se menciona en la sección 2.2.2.

Esto mismo ocurre cuando el mezclado se realiza sobre un molino de dos rodillos, donde los rodillos hacen la función de los rotores en un mezclador interno. Debido a que el molino es un equipo abierto donde no existe una cámara de mezclado cerrada, para que exista flujo de material se requiere la ayuda de un operador que agilice manualmente el desplazamiento del mismo mediante cortes alternativos del material en cada extremo de los rodillos, de manera que fluya de un extremo a otro y lograr el mezclado que se requiere.

## **2.3) EQUIPO PARA MEZCLADO INTENSIVO O DISPERSIVO PARA FORMACIÓN DE COMPUESTOS DE HULE**

Los aparatos empleados para obtener mezclas distributivas son generadores de esfuerzos de corte relativamente bajos.

Por otro lado, para elaborar mezclas dispersivas o de formación de compuestos se requiere maquinaria o equipo que tenga la característica de generar altos esfuerzos de corte, por lo que debe ser mucho más reforzada que aquellos equipos empleados en la elaboración de mezclas distributivas.

Para la elaboración de mezclas intensivas o dispersivas, que es el caso de los compuestos de hule, actualmente se emplean básicamente dos tipos de equipos, los cuales son:

- 1) Molino abierto de dos rodillos
- 2) Mezclador Interno Banbury

### **2.3.1) MOLINO ABIERTO DE DOS RODILLOS**

El equipo más simple y básico, empleado durante mucho tiempo para la realización de mezclas intensivas y elaboración de compuestos de hule, es el molino abierto de dos rodillos, mostrado en las figuras 2.2 y 2.3. Dicho molino está formado por un par de rodillos con ejes dispuestos horizontalmente uno junto a otro, paralelos entre sí formando una "separación" o "abertura" (nip) vertical entre ellos. El elastómero y los aditivos son sometidos a altos esfuerzos de corte en dicho lugar al girar los rodillos en direcciones opuestas. Los rodillos pueden girar a la misma velocidad, pero lo más común es encontrar que giran a diferente velocidad, con una proporción que se encuentra en el rango de 1/1.1 a 1/1.4.

La rotación de los rodillos obliga o empuja a los ingredientes a pasar a través de la "garganta" del molino, la cual es el espacio (abertura) o claro que existe entre los rodillos. El resto de la superficie de uno de los rodillos se usa como medio de transportación para regresar el material al banco que se encuentra sobre los dos rodillos de manera que se continúe con el mezclado. Por conveniencia, a uno de los rodillos se le llama delantero o frontal, y al otro trasero o posterior. El rodillo trasero generalmente gira más rápido que el rodillo delantero a una proporción llamada "razón de fricción". La incorporación de los ingredientes se realiza sobre el rodillo frontal que es el más lento. Por el interior de los rodillos puede hacerse circular agua fría o caliente, vapor o aceite térmico, con el objeto de modificar la temperatura del material que está en contacto directo con la superficie del rodillo durante la operación de mezclado.

Los molinos de dos rodillos realizan convenientemente el mezclado homogéneo en la dirección perpendicular a los ejes, es decir, alrededor de los rodillos; pero no así en la dirección transversal, es decir, a lo largo de los rodillos. Por eso se concluye que este equipo es apropiado para hacer mezclas intensivas o dispersivas, pero inadecuado para hacer mezclas extensivas o distributivas; produce una mezcla bien dispersa pero mal distribuida. Por lo tanto, para alcanzar el mezclado conveniente, es decir, mezclas con buena dispersión y buena distribución, se toman medidas complementarias.

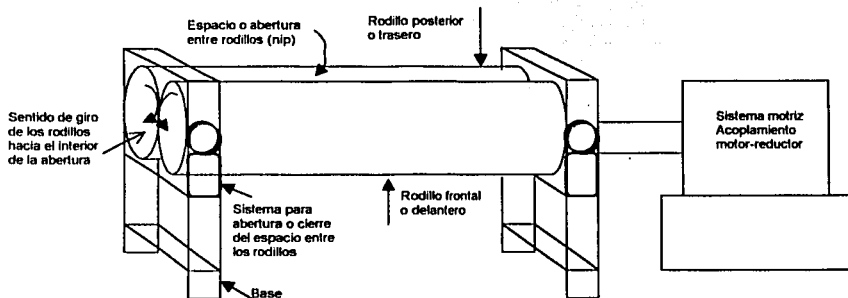


FIGURA 2.2 Esquema de un Molino de dos rodillos

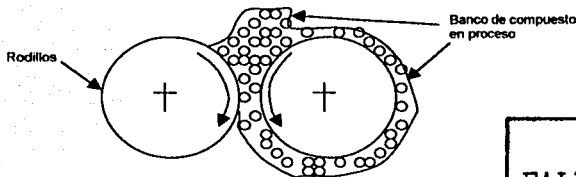


FIGURA 2.3 Molino de dos rodillos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cuando se usa un molino de dos rodillos para mezclar, la técnica consiste en hacer pasar la carga apropiada del material al que se quiere adicionar los aditivos, por lo común un elastómero crudo en el caso de compuestos de hule, por la línea de contacto que existe entre los rodillos (nip) varias veces hasta que se caliente, se reblandezca y forme una banda suave alrededor de uno de los rodillos. Dependerá del elastómero y de las condiciones para que se forme la banda sobre uno de los rodillos; por lo general, será sobre el rodillo más caliente y rápido; sin embargo, reiterando, dependerá del elastómero, por ejemplo en el caso del butilo, formará una banda sobre el rodillo más frío y más lento del molino.

Los cojinetes de los rodillos se mantienen sobre bujes móviles que pueden utilizarse para ajustar la línea de contacto o "separación" entre los rodillos. Dicha línea se ajusta una vez que se ha formado la banda alrededor del rodillo para disponer de un pequeño "banco" (exceso de material) del elastómero en la parte alta de la línea de contacto. Tan pronto como se logra esta condición, puede añadirse los aditivos. Esto se hace distribuyéndolos manualmente a lo largo de la línea de contacto. El molino empieza de inmediato a incorporarlos en el material que se halla sobre los rodillos a medida que el material que está sobre el rodillo y el del "banco" de la línea de contacto se entremezclan. Se ayuda al proceso cortando manualmente la banda con una cuchilla desde una orilla hasta las dos terceras o tres cuartas partes de su anchura, de modo que se



obtiene un faldón que se puede doblar hacia el otro lado. Esto permite un rápido intercambio del material del banco y de la banda, y mejora también la distribución lateral de la carga o lote. Si se dobla y corta muchas veces, desde ambos lados, se logra una buena distribución y buena dispersión. Puede retirarse el lote completo del molino cortando a todo lo ancho y sacando el lote en forma de una hoja continua; si el tamaño del lote es demasiado grande para esto, se cortan varias hojas de tamaño adecuado hasta que se descarga todo el lote.

Existen molinos de muchos tamaños diferentes para cumplir diversas funciones. Los equipos más grandes de producción tienen rodillos de 84", otros tamaños son 60", 48" y 36". Para trabajos a nivel piloto y de laboratorio se usan molinos más pequeños, por lo común con rodillos de 18", 12" y 6".

Mezclar en el molino de dos rodillos es laborioso y tardado, aproximadamente se requieren 2 hr para una mezcla de 200 kg en un molino de 84" de ancho y los resultados dependerán de la habilidad que tenga el operador. Ya no se usan como un procedimiento de producción primario, aunque se usan ampliamente para trabajos a nivel laboratorio, y algunas veces, para producir lotes de prueba.

El molino se usa mucho todavía como el lugar en que se recibe el material mezclado dentro de los mezcladores internos. En este papel es importante:

- Como refinador de la mezcla
- Como enfriador, el mezclador interno produce masas grandes y calientes de compuestos de hule que regularmente requieren enfriamiento;
- Como una forma conveniente para convertir los pedazos grandes en hojas de fácil manipulación;
- Para la adición de ingredientes delicados; por ejemplo, agentes de vulcanización y aceleración, para evitar el fenómeno de la pre Vulcanización.

### 2.3.1.1) ANÁLISIS TEÓRICO DEL MEZCLADO EN UN MOLINO

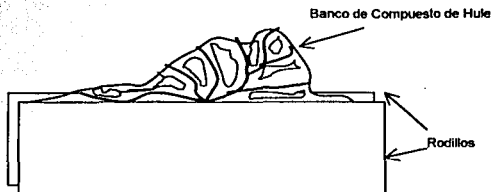
Se han realizado extensos y diversos estudios acerca del mecanismo como se realiza el mezclado de los aditivos en el elastómero cuando se utiliza un molino de dos rodillos.

Se ha demostrado que en ausencia de un banco<sup>1</sup> de elastómero o del compuesto en formación, las fuerzas ejercidas sobre el elastómero que pasa entre los rodillos son exclusivamente de compresión, es decir, normales a la superficie del rodillo. Esta compresión produce un efecto cortante lateral, o sea una acción de mezclado en la dirección periférica, pero no da lugar a ningún efecto de mezclado en el interior, es decir, en todo el espesor de la hoja de elastómero.

La incorporación eficiente de los aditivos en el elastómero, por lo tanto, requiere de la presencia de un banco del compuesto en formación más que de la compresión. No obstante, se ha encontrado que aún con la presencia del banco, si la hoja de dicho compuesto que pasa alrededor del rodillo frontal no se corta y se pliega hacia atrás (tal como en la práctica usual), los aditivos nunca penetran a través de todo el espesor de la hoja, siendo el mecanismo de mezclado como sigue:

<sup>1</sup> Banco de elastómero o compuesto en formación. Es la cantidad de elastómero o compuesto de hule en formación que permanece sobre los rodillos del molino, mientras el resto forma una banda alrededor de uno de los rodillos.

Al entrar al banco, la capa superior del compuesto en formación se pliega y forma arrugas en las cercanías o en el lado de entrada del banco. Los aditivos penetran en estas arrugas y son arrastrados hacia el interior del banco como se observa en la figura 2.4.

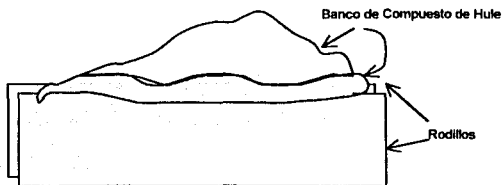


**FIGURA 2.4** Sección de un compuesto de hule sobre un molino, mostrando los aditivos y cargas reforzantes (sombreado) que entran en las arrugas (líneas oscuras) cuando se utiliza un banco pequeño

Este proceso es el responsable del mezclado radial o hacia el interior en una capa activa que nunca llega a ser de todo el espesor de la hoja en los rodillos. De hecho, en una hoja de espesor normal, la capa activa sólo comprende un máximo de aproximadamente las dos terceras partes del espesor total, siendo el tercio restante la parte que está en contacto con el rodillo formando una capa inactiva en que los aditivos que se añaden a la superficie expuesta no penetra, como se puede ver en la figura 2.5. La porción oscura (gris) en la figura representa la parte del elastómero que permaneció sin mezclarse con los aditivos.

Siendo así, en ausencia del corte y del efecto de plegado, la uniformidad de la mezcla es:

- 1) Muy buena en la dirección periférica debido a la acción cortante periférica;



**FIGURA 2.5** Sección de un compuesto de hule sobre un molino, mostrando la capa "inactiva" (gris) en la que no penetró la carga de aditivos y reforzantes

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- 2) Buena en la dirección axial (excepto en los bordes extremos), siempre y cuando los aditivos se agreguen uniformemente a lo largo de la superficie del rodillo;
- 3) Inadecuada en el sentido radial debido a la presencia de la capa inactiva.

También se ha encontrado que en ausencia del cortado, un banco pequeño es más efectivo que uno de gran tamaño, debido a que este último tiene muy pocas arrugas y la parte superior tiende a enrollarse alrededor de su propio eje tal como se muestra en la figura 2.6.

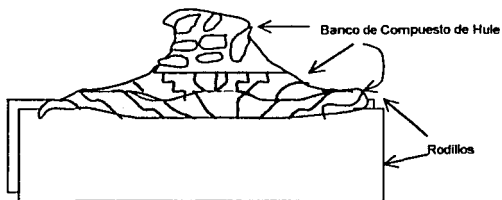


FIGURA 2.6 Sección de un compuesto de hule sobre un molino, mostrando la forma que la carga de aditivos y reforzantes (áreas claras) no logra penetrar cuando el banco es de gran tamaño

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

### 2.3.1.2) CONDICIONES DE OPERACIÓN

La operación de mezclado sobre molinos de dos rodillos, o molienda como también se le puede llamar, fue el método original empleado para mezclar o preparar compuestos de hule; y todavía es empleado para compuestos o formulaciones especiales, o preparar lotes o cargas pequeñas y en donde el volumen de producción requerido es reducido y no se justifica la sustitución de éste por un mezclador interno.

En el proceso de mezclado sobre molinos el control de la temperatura es muy importante. El enfriamiento se realiza normalmente inundando con agua el interior de los rodillos del molino o rociándola, o también haciéndola fluir por los canales de las paredes de los rodillos. Se usa agua helada en donde esté disponible o donde se requiera. La temperatura del compuesto se ajusta regulando el flujo del agua a través de los rodillos. El calentamiento con vapor se utiliza cuando lo que se requiere es el incremento de la temperatura.

La temperatura apropiada para los rodillos durante el mezclado de un compuesto dado, depende sobremanera de la naturaleza del elastómero base del compuesto, y de otros factores tales como el tipo y cantidad de aditivos, cargas reforzantes, plastificantes, etc., que se incorporan al elastómero. A manera de referencia se recomienda que para compuestos a base de nitrilo y EPDM la temperatura de los rodillos sea del rango de 10 a 30°C; para compuestos a base de cloropreno debe ser del orden de 20 a 40°C; y para compuestos a base de butilo y EPDM debe ser del orden de 60 a 80°C. Para compuestos de butilo y EPDM, el rodillo frontal debe ser aproximadamente 10°C más frío que el rodillo trasero, debido a que estos elastómeros tienden a desprenderse del rodillo más caliente durante la manipulación sobre el molino.

El mezclado es causado por la acción de corte que ocurre en la abertura o espacio que existe entre los rodillos. Originalmente, los rodillos de los molinos tenían relaciones de velocidad o relaciones de fricción de 1.4:1.0, y el rodillo más rápido era el trasero, para proporcionar el

desmenuzamiento o desintegración del hule natural. Con la llegada de los hules sintéticos y la estabilidad de las viscosidades, estas relaciones de velocidad o relaciones de fricción se han reducido a 1.12:1.0 y ahora el rodillo más rápido es frecuentemente el rodillo frontal, debido a que la mayoría de los elastómeros o hules sintéticos enbandan o se adhieren más fácilmente sobre el rodillo más rápido.

En la operación de mezclado el elastómero se adiciona primeramente sobre el molino, con una abertura entre los rodillos de aproximadamente 6 mm (0.25 in). Una banda de elastómero se formará a través de la abertura y preferiblemente alrededor del rodillo frontal. Dependiendo del elastómero base, al principio pueden encontrarse varias dificultades para formar la banda alrededor del rodillo. Pero después de algunas pasadas se formará la banda y se mantendrá. Después de formar la banda, se corta hacia delante y hacia atrás varias veces para asegurar el mezclado apropiado y para permitir que el elastómero del banco sobre los rodillos pase a través de la abertura. Es importante hacer eficiente el mezclado del banco sobre los rodillos durante la incorporación de los ingredientes. Todos los ingredientes en seco, a excepción de las cargas de refuerzo y los sistemas de curado, se adicionan en la abertura y el compuesto se corta transversal y diagonalmente hacia atrás y hacia delante para asegurar una buena dispersión de estos ingredientes a través de todo el lote.

El próximo paso es abrir ligeramente el espacio entre los rodillos del molino y adicionar lentamente las cargas reforzantes al lote. Cuando la mayoría de estas cargas se hayan dispersado en el compuesto, los líquidos y cargas sobrantes se adicionan lentamente y alternadamente al lote. Nuevamente se hacen cortes transversales y diagonales a la banda sobre el rodillo para asegurar la buena dispersión de las cargas y plastificantes.

El próximo paso es abrir aún más los rodillos del molino y adicionar los agentes vulcanizantes al lote. Cuando los agentes vulcanizantes estén bien dispersos, el lote completo es cortado hacia atrás y hacia delante al menos cinco veces para asegurar un mezclado e incorporación total en el lote, antes de que ese sea retirado del molino. El lote se retira del molino en forma de una hoja continua o en forma de láminas.

El mezclado en molinos es una operación lenta, la cual requiere el esfuerzo físico constante por parte del operador del molino. No solamente consume tiempo sino que es difícil realizar el control del proceso. Otro de los factores que ha influido para disminuir el uso de los molinos en el proceso de mezclado son las regulaciones ambientales, debido a la cantidad de polvos empleados en los compuestos que se preparan.

### **2.3.1.3) OBSERVACIONES**

El procedimiento normal para manejar un compuesto de hule producido en el mezclador interno o batch es verterlo desde el mezclador hacia un molino. Como se mencionó al principio de ésta sección, el molino de dos rodillos cumple con un objetivo doble: (1) enfriar la carga formando la banda sobre uno de los rodillos, y (2) cambiar su forma física de modo que pueda ser laminada o cortada en forma de hojas para retirarla del molino y alimentarla a un transportador. Además de este objetivo, el molino cumple con la función de una homogeneización adicional y eficiente al compuesto.

La mayoría de los molinos en la industria hulera son de velocidad fija, una relación de fricción fija y un dispositivo manual o automático para fijar la distancia de separación entre los rodillos. Para seguridad y facilidad de operación el rodillo frontal es el que gira a menor velocidad. Estas características se han considerado como estándar en los molinos debido a que mostraron ser efectivos para el hule natural. Sin embargo, muchos de los hules sintéticos presentan mayores dificultades para manipularlos sobre los molinos estándar; pasan del rodillo frontal al trasero con mucha facilidad, alojando la presión que hay entre la separación de los rodillos y "colgándose",

formando bolsas (se abomba sobre el rodillo), se desmenuza o desgaja al pasar por la separación de los rodillos; todos estos problemas representan problemas para el operador del molino. Muchas de las técnicas para hacer frente a estos inconvenientes incluyen la alteración de las fuerzas de adhesión entre los rodillos y el compuesto de hule rociando lechadas o soluciones jabonosas sobre el rodillo frontal, ajustando la distancia de separación entre los rodillos y la temperatura de los rodillos, todo esto basado en experiencias anteriores.

El comportamiento de un compuesto en particular sobre el rodillo laminador del molino depende del balance entre sus propiedades viscosas y viscoelásticas.

Hay cuatro regiones en las cuales el comportamiento del compuesto de hule sobre el molino depende de la temperatura de operación y del elastómero particular implicado. La figura 2.7 muestra el cambio desde la región 1 hasta la región 4 conforme la temperatura se incrementa. Como se observa, es en la región 2 en donde se alcanza la estabilidad en la operación del molino y en donde toma lugar el mezclado adecuado.

Si, a una temperatura dada, el material pasa hacia el rodillo de menor velocidad o al de mayor velocidad, o se cae sin formar una banda sobre el rodillo, depende del tamaño y velocidad del molino y las propiedades reológicas del material. Sin embargo, en general, los materiales tienden a ir hacia el rodillo de mayor velocidad cuando la abertura entre los rodillos es muy pequeña. Cuando la abertura entre los rodillos se incrementa a cierto nivel, el material va hacia el rodillo frontal que es el de menor velocidad. En el punto de transición, el material puede hacer banda sobre el rodillo o caerse sin lograr hacer banda. La figura 2.8 muestra el efecto del tamaño de la abertura de los rodillos sobre el comportamiento del hule sobre un molino.

Así, una fábrica que tiene una amplia variedad de compuestos de hule, para manejarlos sobre un mismo molino requiere tener (1) control de velocidad independiente para cada rodillo, (2) rango de velocidad amplio en ambos rodillos, (3) control de temperatura independiente en cada rodillo, y (4) ajuste de la abertura entre los rodillos manual o automático. Esto habilita a los rodillos a adaptar su velocidad, relación de fricción y temperatura de acuerdo a como lo requiera cada compuesto individual, en lugar de enfrentarse a algunos de los problemas mencionados al manejar numerosos compuestos de diferentes elastómeros bajo las mismas condiciones de los molinos.

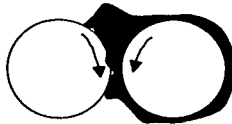
Como se dijo antes, el mezclado en molinos de dos rodillos es una operación lenta, el cual requiere de un esfuerzo físico constante por parte del operador del equipo. El mezclador interno es más ampliamente empleado para éste objetivo por su versatilidad, menor tiempo de mezclado y mayor capacidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

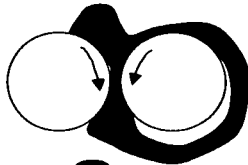
REGION



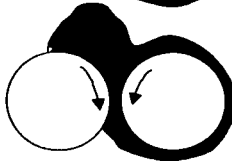
1 Temperatura de rodillos inapropiada. La carga tiende a pasar entre ellos sin formar banda en ninguno de ellos.



2 Temperatura de rodillos adecuada. La carga pasa a través de ellos formando una banda sobre el rodillo delantero.



3 Temperatura de rodillos inapropiada. Aunque la carga ha formado una banda sobre el rodillo delantero, tiende a despegarse de él en la parte inferior, formando una bola de aire.

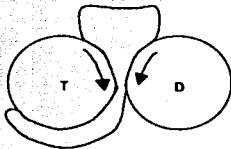


4 Temperatura de rodillos inapropiada. Aunque la carga ha formado una banda sobre el rodillo delantero, tiende a desplazarse hacia el rodillo trasero.

FIGURA 2.7 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento del compuesto de hule sobre un molino de dos rodillos

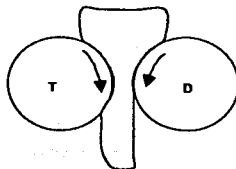
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

DECRECE ← ABERTURA DE RODILLOS → INCREMENTA



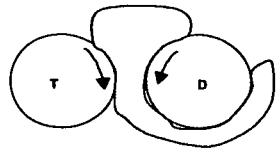
La carga forma una banda sobre el rodillo trasero. Es el rodillo más veloz

T = Rodillo trasero



Zona de transición. La carga no forma banda en ninguno de los dos rodillos

D = Rodillo delantero



La carga forma una banda sobre el rodillo delantero. Es el rodillo más lento

FIGURA 2.8 Efecto de la abertura de los rodillos sobre el comportamiento del compuesto de hule sobre un molino

### 2.3.2) MEZCLADOR INTERNO: BANBURY

El equipo que actualmente tiene mayor presencia en la industria del hule, por muchas razones, es el mezclador interno o mezclador batch, comercialmente conocido como mezclador Banbury, el cual realiza la operación de mezclado en forma intermitente o por cargas (batch). Existen varios diseños comercialmente disponibles para éste equipo; sin embargo, el principio de operación es muy similar en cada uno de ellos. Como se puede observar en el esquema de la figura 2.9, este mezclador tiene las siguientes características:

- Hay dos rotores que giran en sentido contrario uno con respecto a otro dentro de una cámara o recámara; ésta recámara es el espacio dentro del cual se efectúa el mezclado de los ingredientes al ponerlos en contacto (recámara de mezclado); los rotores giran a velocidad diferente uno del otro y son impulsados por un acoplamiento motor eléctrico - reductor de velocidad, sometiendo a la carga a una gran cantidad de esfuerzos cortantes;
- Cada uno tiene dos o cuatro "aspas" que mezclan al untar el material en las paredes de la recámara;
- Un empujador mecánico, llamado martinete, ariete o pisón, mantiene en su lugar a la mezcla, dentro de la recámara;
- La uniformidad de la mezcla se logra por una acción de remolino que se debe a la diferencia de velocidad de los rotores;
- Hay un patrón de flujo complejo dentro del mezclador, con flujo elongacional conforme el material entra el espacio que hay entre los rotores y el flujo cortante a medida que sale;
- Tiene una compuerta abatible o basculante en el fondo de la recámara, la cual al abrir descarga la mezcla una vez que alcanza el punto establecido;
- Los rotores, el pisón, la compuerta de descarga, y las paredes de la recámara tienen una chaqueta por la que circula vapor de agua o agua fría para calentar o enfriar la mezcla, según se requiera;
- Generalmente están equipados con un sensor de temperatura (termopar) dentro de la recámara de mezclado, el cual sensa la temperatura de la mezcla para monitorear el avance del mezclado;
- En la parte superior están equipadas con una tolva por la cual se alimentan los ingredientes a mezclar, ésta cuenta con una compuerta que abre o cierra conforme se requiere alimentar los componentes.

Los mezcladores Banbury son de construcción muy sólida y robusta debido a que se generan grandes esfuerzos al mezclar. Se fabrican en varios tamaños, se identificaban con frecuencia por un sistema de numeración que fue ideado originalmente para indicar el número de molinos de dos rodillos de 60" que reemplazaría el mezclador. Este sistema ahora es obsoleto y los proveedores de estos equipos han adoptado un sistema más lógico que especifica la capacidad en volumen. Como guía se ofrece la siguiente tabla:

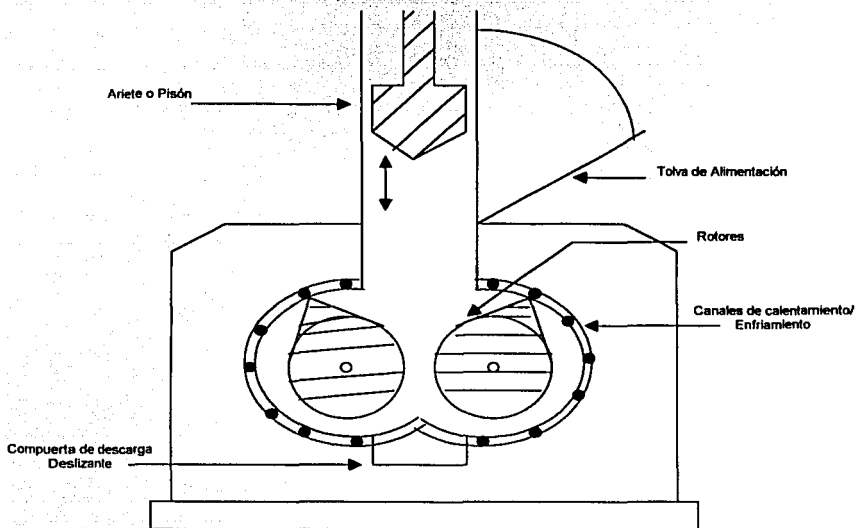


FIGURA 2.9 Esquema del Mezclador Banbury

TABLA 2.1 CAPACIDADES APROXIMADAS DE MEZCLADORES BANBURY

MÁQUINA	TAMAÑO DEL MOLINO	CAPACIDAD NOM.	CAPACIDAD REAL
Banbury No. 11	84 pulg	350 kg	210 kg
Banbury No. 9	84 o 60 pulg	200 kg	150 kg
Banbury No. 3	36 pulg	80 kg	60 kg

Más recientemente, la compañía Francis Shaw Ltd. creó un diseño especial para mezclador interno, cuyo modelo se conoce como el Internix. Tiene una apariencia muy similar a la del Mezclador Interno Banbury, pero con las siguientes diferencias:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- **Rotores masivos con aletas planas superiores que forman una malla;**
- **El mezclado entre los rotores es similar al de un molino;**
- **Igual que en el Banbury, un pisón neumático mantiene la carga a mezclar entre los rotores;**
- **Las delgadas capas resultantes se prestan a un mejor enfriamiento, característica muy importante al mezclar compuestos de hule, ya que tienen mayor superficie de enfriamiento;**
- **Permiten mayor entrada de energía antes de que se alcance una temperatura crítica.**

Las ventajas que ofrecen este tipo de mezcladores a la industria de formación de compuestos, sin lugar a dudas, son enormes.

- **Primero y lo más importante, es que incrementan la producción. Por ejemplo, un lote de 200 kg de algún compuesto de hule con alto contenido de aditivos requeriría 2 hr de mezclado en un molino abierto de dos rodillos. Un mezclador Banbury del No. 11 produce 350 kg en 15 minutos o menos.**
- **Segundo, la uniformidad del producto mejora considerablemente. El mezclado de cada carga o lote se realiza en idénticas condiciones debido a que la intervención del operador es mínima, y generalmente es para realizar la alimentación de los ingredientes.**
- **Tercero, aunque disminuye el tiempo de fabricación de un lote de compuesto dado, el consumo de energía para fabricarlo no se incrementa en lo más mínimo. Como ya se ha visto, este tipo de mezcladores son de construcción muy sólida y robusta, y requieren altas entradas de energía, por ejemplo, un Banbury del No. 11 necesita un motor de 500 o 1000 hp, dependiendo de la tenacidad o dureza de la mezcla que se produce.**

Las técnicas consideradas hasta ahora se utilizan principalmente para polímeros gomosos. Estos incluyen los elastómeros tanto naturales como sintéticos, que se utilizan para obtener láminas por calandrado y perfiles alargados por extrusión, por ejemplo, para marcos de ventana, accesorios para bajantes de agua en edificios, manguera, tubería, aislamiento para cable, cubiertas para uso industrial y de vestimenta, bandas transportadoras, llantas, cámaras para llantas, accesorios automotrices, entre muchos otros. La mayoría de estos compuestos de hule contienen aditivos modificadores importantes:

- **El sistema de curado o vulcanización para el elastómero;**
- **Plastificantes;**
- **Cargas reforzantes y no reforzantes;**
- **Otros polímeros;**

Y muchos más.

Los compuestos requieren de control constante y cambio detallado durante el proceso de fabricación. Una característica propia del diseño del compuesto de hule en estos casos es la creación de compuestos que deben cumplir una especificación del producto a fabricar. Por lo tanto, estos procedimientos se hacen "en casa", y los departamentos de mezclado y de formación de

compuestos, generalmente conocidos como "procedimiento primario", son muy importantes en tales industrias.

En seguida se describe un procedimiento típico de mezclado utilizando un mezclador interno.

- a) Primero se añade el elastómero al mezclador vacío, para calentarlo o para romper el "nervio" (característica común en los polímeros gomosos);
- b) Si se usan varios polímeros, se mezclan en esta etapa hasta lograr una masa homogénea;
- c) Los aditivos se agregan gradualmente para mantener la coherencia del polímero. Así, los aditivos que se usan en pequeñas proporciones se deben agregar primeramente para asegurar una buena distribución y una buena dispersión en todo el seno del polímero. Luego se añaden los materiales voluminosos de relleno o de refuerzo en dos etapas. Esto es para asegurar que se sigue la fase continua del polímero. Una vez que se pierde la coherencia de la fase polimérica, por lo común, es imposible recuperarla. El resultado es una mezcla "desmenuzada" que se desecha normalmente.
- d) Se emplean diversos medios para determinar el punto final de una mezcla.

En algunos casos es posible simplemente regularizar las adiciones a través del tiempo y la duración total para mezclar, esto es conocido como mezclado o descarga por tiempo. Otra técnica consiste en observar la corriente utilizada por el motor, la cual se incrementa y va disminuyendo conforme se hace la mezcla. O bien, se puede observar la temperatura de la mezcla conforme ésta se está realizando, la cual se incrementará hasta cierto punto, y "descargar" la mezcla en un momento apropiado conforme a lo que se requiere. Éste último se conoce como mezclado o descarga por temperatura. En la figura 2.10 se ilustran algunos patrones típicos.

## **2.4) PROBLEMAS COMUNES EN LA OPERACIÓN DE MEZCLADO DE COMPUESTOS DE HULE**

La mayoría de los problemas del proceso de mezclado se relacionan principalmente con: (1) dispersión; (2) prevulcanización; (3) contaminación; (4) mala procesabilidad en el molino; y, (5) variación entre cargas. Las causas de estos graves problemas son muchas y diversas. En la mayoría de los casos, es más difícil identificar la causa de un problema que hallar su solución. La acción correctiva es regularmente simple una vez que se halla la causa específica del problema. Las siguientes tablas proporcionan una guía de causas comunes de los mayores problemas del proceso de mezclado y se presentan a manera de un check list.

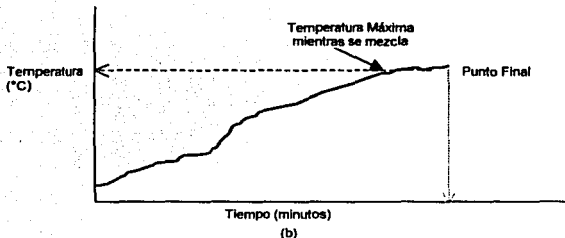
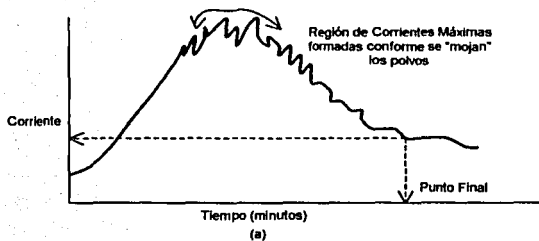


FIGURA 2.10 Posibles puntos finales en el mezclador Banbury: (a) utilizando consumo de corriente; (b) utilizando la temperatura de la mezcla.

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

**TABLA 2.2 CAUSAS POSIBLES DE UNA MALA DISPERSIÓN**

**A) PROCESO**

- 1) Tiempo de mezclado insuficiente
- 2) Temperatura de descarga, o muy baja o muy alta
- 3) Adición simultánea de materiales ácidos y básicos (tal como ácido esteárico junto con óxido de zinc)
- 4) Masticado insuficiente de elastómeros
- 5) Adición de ingredientes en orden inadecuado
- 6) Adición de cargas reforzantes muy tarde durante el ciclo de mezclado
- 7) Adición simultánea de negro de humo de partícula pequeña y resinas o aceite viscoso
- 8) Tiempo insuficiente para dispersar óxidos metálicos
- 9) Adición de plastificantes líquidos después de que la carga ha comenzado a desmenuzarse
- 10) Tamaño de carga, o muy grande o muy pequeña

**B) MANO DE OBRA**

- 1) Incumplimiento del procedimiento de mezclado al pie de la letra
- 2) Permitir que los aglomerados de materiales se peguen tanto en el pisón como en las paredes de la recámara de mezclado
- 3) Uso de velocidades erróneas de los rotores

- 4) Retirar muy rápido la carga del molino

### C) EQUIPO

- 1) Control deficiente de la temperatura del mezclador
- 2) Presión del pisón (martinete) insuficiente
- 3) Control deficiente de la temperatura de los rodillos del molino

### D) MATERIALES

- 1) Envejecimiento del elastómero
- 2) Hules EPDM y Butilo frios
- 3) Hule natural helado
- 4) Hule natural con premastizado insuficiente
- 5) Humedad excesiva en las cargas reforzantes
- 6) Adición de ingredientes viscosos por debajo de su punto de flujo
- 7) Uso equivocado de ingredientes

### E) DISEÑO DEL COMPUESTO

- 1) Uso de elastómeros con viscosidad Mooney considerablemente diferentes
- 2) Plastificantes incompatibles con el elastómero
- 3) Demasiados ingredientes en forma de pellets duros
- 4) Grandes cantidades de cargas reforzantes de partículas pequeñas
- 5) Uso de resinas con punto de fusión excesivamente altos
- 6) Plastificantes líquidos insuficientes
- 7) Carga excesiva de reforzantes y plastificantes

### TABLA 2.3 CAUSAS POSIBLES DE PREVULCANIZACIÓN

- 1) Enfriamiento insuficiente del mezclador
- 2) Sistema de curado o vulcanización actúa muy rápido
- 3) Temperatura de descarga muy alta
- 4) Adición de aceleradores al mezclador en un tiempo erróneo
- 5) Mala dispersión de aceleradores y/o agentes vulcanizantes
- 6) Acumulación de residuos de resina en los rotores
- 7) Omisión de agentes retardantes
- 8) Pesado incorrecto de ingredientes
- 9) Uso de velocidades muy altas de los rotores
- 10) Temperaturas de carga inicial muy altas
- 11) Gran cantidad de reforzantes en pequeñas partículas
- 12) Plastificantes líquidos insuficientes
- 13) Apilado o estibado del compuesto mientras éste se encuentra todavía caliente y húmedo

### TABLA 2.4 CAUSAS COMUNES DE CONTAMINACIÓN

- 1) Contaminación física de los elastómeros y hule químicos por polvo, basura, arena y otros materiales
- 2) Contaminación química de hules butilo y EPDM por otros elastómeros como hule natural y hule nitrilo
- 3) Uso erróneo de ingredientes
- 4) Filtración de aceite quemado desde los sellos del mezclador
- 5) Compuesto residual pegado en los rotores, compuerta de descarga, recámara de mezclado y pisón. Este problema se reduce si se realizan cargas de limpia en forma periódica dentro del mezclador.

- 6) Compuesto residual que se pega en las partes del molino, como guías, cabezales, etc.
- 7) Acumulación de residuos en los anillos del mezclador
- 8) Limpieza deficiente de las áreas vecinas al mezclador interno y al molino mezclador

**TABLA 2.5 POSIBLES CAUSAS DE MALA PROCESABILIDAD EN EL MOLINO MEZCLADOR**

- 1) Temperatura de los rodillos del molino fuera de especificación
- 2) Control deficiente de las temperaturas de los rodillos del molino, la relación de velocidad y de fricción
- 3) Viscosidad Mooney del compuesto muy baja
- 4) Cantidad excesiva de resinas
- 5) Altas cantidades de cargas de relleno (tal como arcilla)
- 6) Gran cantidad de plastificantes viscosos
- 7) Carencia de ayudas de proceso apropiadas en la formulación
- 8) Cantidad del lote excesiva o deficiente
- 9) Mala selección de la viscosidad del elastómero
- 10) Mala dispersión
- 11) Compuesto propenso al quemado o prevulcanizado

**TABLA 2.6 CAUSAS COMUNES DE VARIACIÓN ENTRE CARGAS**

- 1) Variación de la temperatura de carga inicial
- 2) Variación en la temperatura y/o flujo del agua de enfriamiento
- 3) Variación en la presión del pisón
- 4) Errores en el pesado de los ingredientes
- 5) Diferencia de los ingredientes entre lote y lote de cada uno de ellos
- 6) Uso de ingredientes sustitutos
- 7) Variación en la temperatura y/o tiempo de descarga
- 8) Diferentes formas de manejar los compuestos en el molino mezclador por parte de diferentes operadores
- 9) Diferentes niveles de dispersión



### 3) OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN

### 3) OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN

Después de obtener el compuesto que se utilizará en la fabricación del artículo de hule, mediante el mezclado, las operaciones subsecuentes son variadas y diversas. Una de ellas es el proceso de extrusión.

La extrusión es el proceso mediante el cual se hace pasar un compuesto de hule a través de una boquilla para darle una forma o perfil. Se realiza mediante presión o una fuerza de empuje que impulsa al compuesto a pasar a través de un espacio y adquirir la forma que tiene éste. Se dice que la extrusión es una de las etapas de preformado o configuración. **El objetivo del proceso de extrusión es, a partir de un compuesto de hule que es un cuerpo amorfo, obtener un cuerpo con forma, que en muchos casos será la forma final del producto.**

La extrusión se hace con un equipo llamado **extrusor o extrusora**, el cual se define precisamente como **una máquina que forza a pasar al compuesto de hule a través de una boquilla, dado o cabezal de teclas ajustables para darle forma o perfil**. Las extrusoras se dividen en dos tipos: aquellas en las que la presión requerida para pasar el hule a través de la boquilla es producida por un ariete o émbolo, y aquellas en las que la presión es producida por un tornillo sin fin o tornillo de Arquímedes. Las extrusoras tipo ariete son limitadas para usos especiales. Las extrusoras tipo tornillo son más ampliamente usadas en la industria del hule.

Actualmente el proceso de extrusión es un proceso continuo, a diferencia del proceso de mezclado, ya sea en mezcladores internos o molinos, que es un proceso intermitente o por cargas.

En un principio, el proceso de extrusión fue intermitente, ya que el equipo que se empleaba, que era la extrusora tipo ariete o émbolo, así lo permitía. Sin embargo, las necesidades de tener un mayor volumen de producción exigidos por un mercado creciente, obligó a los fabricantes a buscar un método alternativo de fabricación, inventándose así la extrusora tipo tornillo, que dejó de ser un método alternativo para convertirse en un método sustituto del original.

La extrusora tipo tornillo es importante debido a que continuamente convierte la alimentación a una forma final, tal como tubos, cañuelas o perfiles. La alimentación puede ser en forma de listón o tira continua, o gránulos. El componente que realiza la conversión es un tornillo de Arquímedes el cual se ubica dentro de un barril<sup>1</sup>. A lo largo del barril hay un número de collares que forman zonas de calentamiento o enfriamiento. El material es empujado hacia delante por la rotación del tornillo. Conforme se mueve hacia delante, el material es ablandado o suavizado por el calor friccional desarrollado por la acción cortante del tornillo, complementado por el calor de las paredes del barril.

Actualmente, la extrusión es un proceso básico en la manufactura de productos de hule.

En su forma más simple una extrusora tipo tornillo consiste de tres componentes: 1) un tornillo de alimentación que gira dentro de un barril; 2) una cabeza; y, 3) un dado o boquilla. Un motor eléctrico acoplado a un reductor de velocidad hacen girar el tornillo. El compuesto de hule entra a la garganta de alimentación, es empujado a lo largo del barril en donde aumenta su presión y temperatura, pasa por la cabeza en donde tenderá a igualar la presión ejercida por el tornillo, y saldrá por la boquilla o dado, en donde finalmente adquirirá la forma que éste tenga, obteniendo así el compuesto extruido.

Algunos de los aspectos que se presentan durante la operación de extrusión, y que se analizarán en este trabajo son:

<sup>1</sup> Barril. Es la envoltura o coraza dentro de la cual se encuentra el tornillo de Arquímedes, y a través de la cual fluye el compuesto de hule toda vez que es empujado o doificado por dicho tornillo.

- 1) Flujo
- 2) Equipo de extrusión (Extrusor, Cabeza, Dado)
- 3) Problemas Comunes en el Proceso de Extrusión

### 3.1) FENÓMENO DE FLUJO

En un sistema de extrusión, el flujo de los materiales representa un tema muy importante, debido a que precisamente lo que se persigue es el movimiento o desplazamiento de los materiales de un punto a otro. Además de importante, es un tema muy complejo que requiere del desarrollo y del análisis matemático. En este trabajo, la teoría se expondrá de manera muy simple, a modo de entender su fundamento.

La teoría del flujo en los sistemas de extrusión ha sido desarrollada principalmente para los plásticos que muestran tener propiedades de fluidos newtonianos; aunque experimentalmente se ha demostrado que las conclusiones de estas teorías pueden aplicarse a los materiales con propiedades de fluidos no newtonianos "moderados". Este concepto no ha sido definido completamente; por lo tanto, no es posible indicar qué tanto se adaptan estas conclusiones a los materiales con propiedades de fluidos totalmente no newtonianos, como es el caso de los compuestos de hule. Algunos investigadores han demostrado experimentalmente que estas teorías requieren de alguna modificación para ser aplicadas al caso de los compuestos de hule.

#### 3.1.1) MECANISMOS BÁSICOS DE FLUJO

El movimiento del material dentro del barril de un sistema de extrusión, alimentado mediante un tornillo, es la resultante de cuatro mecanismos de flujo. Antes de mencionar dichos mecanismos de flujo, deben hacerse las siguientes consideraciones:

- a) Ya que la estría del tornillo forma un ángulo  $\phi$  con cualquier círculo de generación del cilindro perteneciente al tornillo, la velocidad rotacional ( $U$ ) de la superficie del tornillo puede descomponerse en un componente "transversal"  $U \text{ Sen } \phi$  (perpendicularmente al filete) y en un componente "longitudinal"  $U \text{ Cos } \phi$  paralelo al filete.
- b) Dentro del barril existe una presión hidrostática cuyo valor máximo ( $P$ ) se encuentra en el cabezal (justamente a la entrada de la matriz) y que disminuye hasta cero en el orificio de la matriz y en la abertura de alimentación.

Los cuatro mecanismos básicos de flujo se describen a continuación:

- 1) **Flujo Transversal.**- Este se debe a la velocidad transversal  $U \text{ Sen } \phi$ , ya que éste actúa a través de los canales del tornillo, no tiene influencia a lo largo del canal, sino que únicamente provoca un flujo de circulación, que sin embargo, puede llegar a ser de importancia cuando se trate de igualar la temperatura. Este flujo se muestra en la figura 3.1.



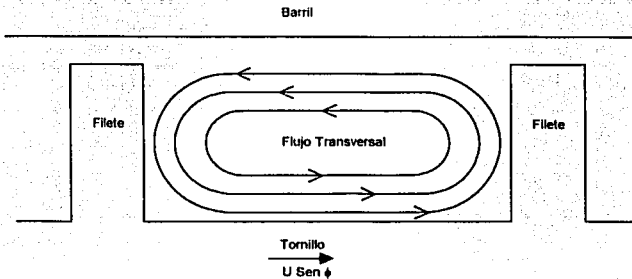


FIGURA 3.1 Flujo Transversal (circulante) en la estría del tornillo

- 2) **Flujo de Arrastre.**- Este se debe a la velocidad longitudinal  $U \cos \phi$ , que no es más que el desplazamiento o el avance real del material en extrusión a lo largo del tornillo; observando el canal en la sección longitudinal, este flujo puede representarse por medio de la figura 3.2 (a).
- 3) **Flujo de Presión.**- El gradiente de presión que decrece del cabezal a la alimentación provoca que el material fluya hacia atrás a lo largo del canal; es decir, es un flujo en retroceso que se opone al flujo del material hacia delante; la figura 3.2 (b) representa el gradiente de presión. La resultante de esto y del flujo de arrastre se muestra en la figura 3.2 (c).
- 4) **Flujo de Fugas o Escapes.**- Esto se observa a modo de flujo en retroceso a través del claro entre el barril y la parte superior del filete, y también se debe al gradiente de presión.

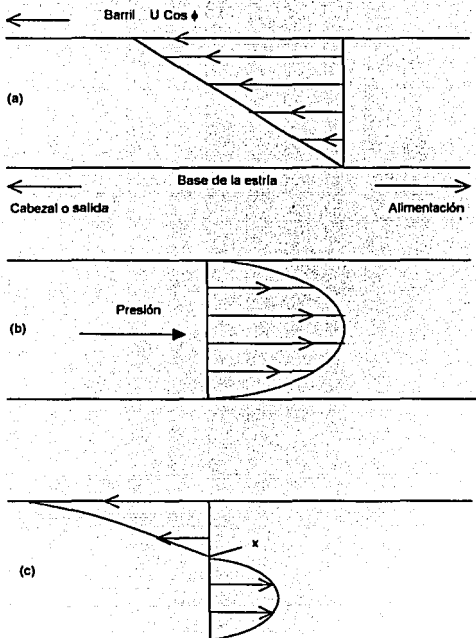
Si se denota al flujo de arrastre por  $Q_0$ , que como se dijo en la definición, es el flujo o avance real del material y el que nos interesa cuantificar; el flujo de presión por  $Q_p$  y al flujo de escapes o fugas por  $Q_L$ , se tendrá que el flujo total de salida  $Q$  sin considerar el flujo transversal por no influir en el resultado, es decir, el flujo útil o la cantidad resultante de la extrusión está dado por la expresión siguiente:

$$Q = Q_0 - Q_p - Q_L$$

en la que todas las cantidades se expresan como volumen por unidad de tiempo.

Para comprender mejor el mecanismo de transporte, considérese dos extremos:

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 3.2 a) Flujo de Arrastre, b) Flujo de Presión, c) Resultante de los flujos de Presión y de Arrastre a lo largo de la estría del tornillo

- 1) El material se adhiere únicamente al tornillo y se desliza sobre el barril. Bajo estas condiciones, el tornillo y el material simplemente girarían como un cilindro sólido y no habría transporte.
- 2) El material resiste la rotación en el barril y se desliza sobre el tornillo. En este caso tiende a ser transportado axialmente como un tornillo de Arquímedes normal, de canal profundo que se usa para transportar sólidos.

En la práctica, hay fricción tanto con el tornillo como con el barril, y esto conduce al mecanismo de transporte principal, el *flujo por arrastre*. Literalmente, es el arrastre del material fundido a lo largo del tornillo como resultado de las fuerzas de fricción, y es el equivalente al arrastre viscoso entre las placas estacionaria y móvil separadas por un medio viscoso. Esto constituye la componente de transporte del extrusor.

Se le opone la componente del *flujo de presión*, producido por el gradiente de presión que hay a lo largo del extrusor. Como se mencionó, hay presión alta en el extremo del dado y baja en el extremo de alimentación. Este gradiente de presión se opone al *flujo de arrastre*. Es importante comprender que no hay flujo real resultante debido a la presión, únicamente es una oposición.

El componente final en el modelo de flujo es el *flujo de fuga*. Hay un espacio finito entre el tornillo y el barril a través del cual se puede fugar el material. Éste es también un flujo impulsado por presión que también se opone al flujo.

Por lo tanto, el flujo total es el balance de estos componentes.

### 3.1.2) EXPRESIONES DE LOS MECANISMOS DE FLUJO

A continuación se presentarán las expresiones matemáticas que definen a los tres tipos de flujos, de manera que pueda cuantificarse el flujo útil. Obsérvese como dependen de las características del sistema de extrusión y del material que pasa por el mismo.

#### 1) *Flujo de Arrastre*

Haciendo varias suposiciones y simplificaciones, y empleando la analogía del flujo que hay entre un par de placas paralelas, se deduce la siguiente expresión:

$$Q_0 = (\frac{1}{2})\pi^2 D^2 NH \text{ Sen}\phi \text{ Cos}\phi$$

Así, se ve que el *flujo de arrastre* depende de:

- ◆ Diámetro del tornillo  $D^2$
- ◆ Rapidez del tornillo  $N$
- ◆ Profundidad del canal  $H$
- ◆ Ángulo de hélice  $\phi$

O sea, el volumen del canal x rapidez, con un factor de corrección debido al ángulo de hélice. El ángulo de hélice se fija de manera universal al ángulo "cuadrado" de 17.66°, o sea, una vuelta por longitud del diámetro del tornillo.

#### 2) *Flujo de Presión*

Recurriendo nuevamente a la analogía del elemento finito de fluido en un canal entre placas paralelas y luego aplicando el resultado al canal de un extrusor. Así, se tiene que:

$$Q_p = \frac{\pi D H^3 \text{Sen}^2 \phi}{12 \eta} \left[ \frac{dP}{dt} \right]$$

En donde:

P = Presión en el cabezal del sistema de extrusión

l = Longitud de la matriz (en dirección del flujo)

$\eta$  = Viscosidad del material que se somete a extrusión

Se ve entonces que el *flujo de presión* depende de

- ♦ Las dimensiones del tornillo, al depender de la tercera potencia de la profundidad del canal
- ♦ El gradiente de presión
- ♦ La viscosidad del fluido

### 3) Flujo de Fuga

Como se vió, el flujo de fuga es otra componente del flujo debido a la presión. La forma es la de una ranura ancha:

H =  $\delta$ , la profundidad de la ranura y

T =  $\pi D / \text{Cos } \phi$ , el ancho de la ranura

El flujo de fuga es pequeño en comparación con el flujo de arrastre y el flujo de presión y puede ignorarse al calcular el flujo total. Únicamente tiene significado práctico en máquinas desgastadas en las cuales se vuelve grande el espacio libre que hay entre el tornillo y el barril.

### 4) Flujo Total

Se puede encontrar fácilmente el flujo de salida total o flujo útil Q restando la expresión del flujo de presión del flujo de arrastre:

$$Q = Q_0 - Q_p$$

$$Q = \left( \frac{1}{2} \right) \pi^2 D^2 N H \text{Sen} \phi \text{Cos} \phi - \frac{\pi D H^3 \text{Sen}^2 \phi}{12 \eta} \left[ \frac{dP}{dt} \right]$$

Esta es una expresión compleja, que se simplifica para fines prácticos. Para un extrusor dado,  $\alpha$ ,  $D$ ,  $H$  y  $\phi$  son fijos; entonces se puede decir

$$Q = \alpha N \cdot \left[ \frac{\beta P}{\eta} \right]$$

Las variables prácticas para la operación del extrusor son:

- ◆ La rapidez del tornillo  $N$
- ◆ La presión frontal  $P$
- ◆ La viscosidad del material fundido

La expresión anterior para la salida de un extrusor es obviamente una simplificación. Los dos factores importantes que faltan son a) las propiedades reológicas del fluido no newtoniano, que es el caso de la mayoría de los polímeros fundidos y compuestos de hule en estado gomoso; y, b) sus propiedades de fricción.

La expresión general para el flujo de arrastre se basó en cierto número de suposiciones que la simplificaron:

- El material fundido se comporta como un fluido newtoniano.
- Por lo tanto, la viscosidad en todos los puntos es la misma.
- Existe un gradiente de velocidad que va desde cero en el tornillo hasta un valor máximo en la pared del barril.

Estas suposiciones conducen al factor de  $\frac{1}{2}$  de la ecuación del flujo de arrastre:

$$Q_D = \frac{1}{2} (\pi^2 D^2 NH \text{ Sen}\phi \text{ Cos}\phi)$$

es decir, es una constante de integración.

Pero en realidad, los compuestos de hule son fluidos no newtonianos; además, la velocidad no puede ser cero en el tornillo, ya que significaría la presencia de una capa estancada que se degradaría. El material debe deslizarse sobre las superficies y las características de deslizamiento se representan mediante los coeficientes principales de fricción. Estos varían en un amplio intervalo para diferentes polímeros y compuestos de hule; además, dependen mucho de la temperatura. La condición de flujo de arrastre se representa mejor si se reemplaza el factor  $\frac{1}{2}$  por uno más general,  $F$ , el cual incluye los comportamientos friccional y viscoso del compuesto de hule:

$$Q_D = F (\pi^2 D^2 NH \text{ Sen}\phi \text{ Cos}\phi)$$

Bajo condiciones ideales,  $F = \frac{1}{2}$ , pero con baja fricción del barril, la alta fricción del tornillo y baja viscosidad aparente,  $F \rightarrow 0$  y el flujo de arrastre tienden hacia cero.

## 3.2) EQUIPO PARA LA OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN

Como se menciona al principio de éste capítulo, la operación o proceso de extrusión es la acción de forzar, por medio de presión, a pasar a través de un "dado" o "boquilla" un material fundido o en estado gomoso, como es el caso de los compuestos de hule. Esta operación se ha empleado durante muchos años para metales, como el aluminio, que fluyen plásticamente cuando se someten a una presión de deformación. Actualmente, los equipos de extrusión empleados utilizan tornillos para hacer fluir el material fundido o en estado gomoso, aunque en sus inicios fueron usados los de tipo émbolo. El tipo de máquina que más se emplea es el de tornillo simple, cuyo esquema general se muestra en la figura 3.3.

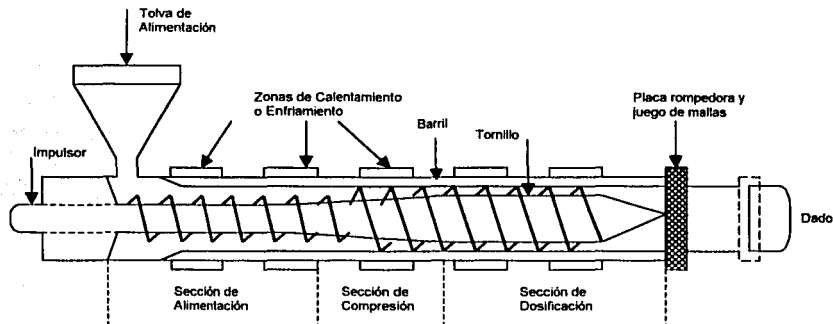


FIGURA 3.3 Características principales de un Extrusor de Tornillo Sinfin simple

Un extrusor o extrusora, como comúnmente se les denomina a los equipos de extrusión, está constituido principalmente por un tornillo de Arquímedes, que se ajusta con precisión dentro de una camisa cilíndrica o barril, apenas con el espacio suficiente para rotar.

### 3.2.1) EXTRUSOR DE TORNILLO SIMPLE

El tornillo de un extrusor tiene uno o dos "hilos" en espiral a lo largo de su eje. El diámetro medido hasta la parte externa del hilo es el mismo en toda la longitud para permitir un ajuste preciso en una camisa cilíndrica, con un claro suficiente para permitirle girar. La raíz o núcleo es de diámetro variable, de manera que el canal en espiral varía en profundidad. En general, la profundidad del canal disminuye desde el extremo de alimentación hasta el extremo del dado, como se muestra en la figura 3.4, aunque existen modificaciones con fines especiales. Una

consecuencia de que disminuya la profundidad del canal es el incremento de la presión a lo largo del extrusor, y ésta es la que impulsa al material a pasar a través del dado. Para su análisis y mejor comprensión, un extrusor se puede dividir en cuatro partes, cuyas funciones se describen a continuación.

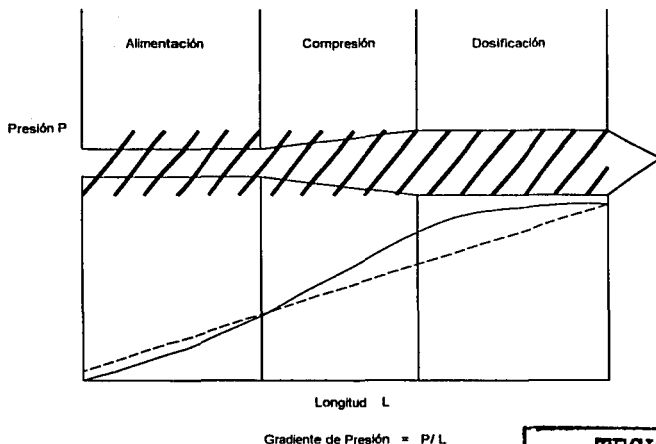


FIGURA 3.4 Zonas en un Extrusor de Tornillo Simple

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 1) Zona de Alimentación

Es la primera parte de un extrusor, y es precisamente la zona por donde se suministra a éste el material que será extruído. Aquí, se precalienta el material cuando la alimentación se realiza en frío, o continúa calentándose si es que ha experimentado un calentamiento previo; y además, se transporta a las partes siguientes. La profundidad del tornillo es constante y la longitud es tal que hay una alimentación correcta hacia adelante, ni deficiente ni excesiva.

### 2) Zona de Compresión

La segunda zona tiene una profundidad de canal decreciente. Tiene diferentes funciones y se le conoce, por lo común, como zona de "compresión" o de "transición". Teóricamente esta zona tiene tres funciones. Primeramente, se expulsa el aire atrapado en la masa fundida; en segundo lugar, se mejora la transferencia de calor desde las paredes del barril; en tercer lugar, ocurre el cambio de densidad y viscosidad por el aumento de temperatura. La longitud de esta zona puede variar desde el diseño del equipo, dependiendo del elastómero o polímero que será extruído en dicho equipo.

### 3) Zona de Dosificación

La tercera zona tiene una profundidad de canal constante. Su función es la de homogeneizar el material que se encuentra fluyendo desde la zona de alimentación, y con ello suministrar a la región del dado material de calidad homogénea a temperatura y presión constantes.

### 4) Zona del dado

La zona final de un extrusor es la zona del dado, que termina en el propio dado. Situado en esta región se halla el *portamallas*. Ver figura 3.3. Esta consta, por lo común, de una placa de acero perforada conocida como la *placa rompedora* y un juego de mallas de dos o tres capas de gasa de alambre situadas en el lado del tornillo.

El ensamble de la placa rompedora – juego de mallas tiene tres funciones:

- 1) Evitar el paso de material extraño: polvos, cuerpos, contaminaciones, etc. El cribado ayuda a reducir los defectos del producto más adelante al remover las partículas no deseadas. A menudo quedan atrapadas en la malla partículas de metal o, inclusive, tuercas o tornillos pequeños, así como por ejemplo, aglomerados de material de refuerzo que escaparon a la dispersión. Además de provocar producto defectuoso, las partículas metálicas dañan el dado.
- 2) Crear una frente de presión cuando se opone una resistencia al bombeo de la zona anterior. La importancia de crear una frente de presión radica en que esta presión es la que suple la fuerza impulsora para vencer la resistencia del dado.
- 3) Eliminar la "memoria de giro" del material o compuesto en extrusión. En muchos casos, el elastómero o compuesto "recuerda" su trayecto en giros a lo largo de la espiral del tornillo aún después de haber pasado por el dado, y esto puede dar como resultado una deformación por torsión del producto. Cuando el material fundido o gomoso se somete a un tratamiento mecánico prolongado, como el paso por un tornillo, se produce un notable alineamiento de las cadenas; esto se nota como una tendencia hacia recuperar elásticamente este alineamiento como la configuración energética óptima. El paso a través del dado es rápido, sin que haya tiempo de sustituir la configuración de espiral por una nueva. El resultado es una tendencia del producto a torcerse una vez que escapa a la restricción del dado y antes de que se enfríe.

Las zonas del tornillo de extrusión pueden dividirse equitativamente en las zonas que se han descrito en los párrafos anteriores, o en diferentes proporciones para cada zona; esto dependerá del elastómero o compuesto de hule a extruir. En la figura 3.5 se muestran varios esquemas de tornillos de extrusión. El esquema que se muestra en la figura 3.5(d) es el diseño que más comúnmente se usa en la industria del hule para la mayoría de compuestos y artículos que se fabrican, debido a que la alimentación al equipo extrusor se realiza con calentamiento previo del compuesto de hule y, por lo tanto, la función más importante que debe realizar el tornillo sinfin del equipo extrusor es la de dosificación del material hacia la zona del dado o boquilla, como se explica en el párrafo anterior de zona de dosificación.

Cuando la alimentación del compuesto de hule hacia el equipo extrusor se realiza sin un calentamiento previo del primero, entonces se requiere que el tornillo sinfin tenga alguno de los diseños mostrados en la figura 3.5(a) a 3.5(c), o si el compuesto de hule muestra propiedades de un material termoplástico, que es la tendencia actual de los compuestos de hule.



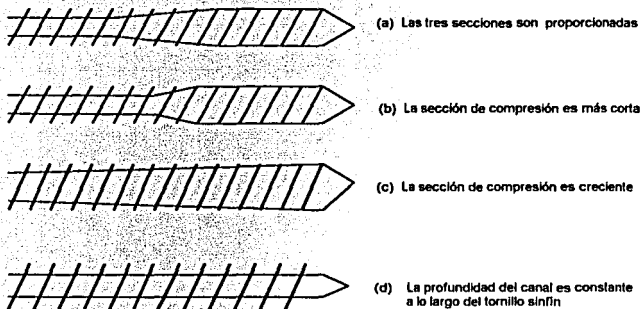


FIGURA 3.5 Diferencias en el diseño del tornillo

### 3.2.2) DADO DE EXTRUSIÓN

**Dado:** Se le llama así a la boquilla acoplada a la salida de la cabeza de un extrusor por la cual fluirá el compuesto de hule, y su objetivo principal es darle forma o perfil a todo el material que fluya a través de él. Por lo tanto, el perfil del compuesto de hule dependerá del perfil del dado de extrusión. La forma que tenga el dado será la forma del producto que se obtenga durante la extrusión del compuesto de hule. El dado puede estar conformado por una sola pieza o por un juego de piezas, y siempre se colocan en el extremo de salida de la cabeza de extrusión. Otra forma de dar perfil al compuesto es con las teclas o cabezal de teclas que algunas extrusoras tienen en lugar del dado, ajustando la distancia y altura entre los tornillos que forman dicho cabezal. Las extrusoras de este tipo se llaman Beraco (que es la marca comercial del equipo).

#### 3.2.2.1) DISEÑO

El diseño óptimo de un dado de extrusión es complicado. Aunque algunos de los fundamentos están bien definidos y el comportamiento de los materiales se conoce, aún hay factores de diseño y construcción que se basan en la experiencia.

El principal criterio a tomar en cuenta para diseñar un dado de extrusión debe basarse en el patrón de flujo a desarrollar por el material a su paso por el dado.

De acuerdo a la experiencia, el mejor diseño de un dado de extrusión es aquel que promueve o mantiene el flujo laminar del material que pasa a través de él, de manera que se eviten cambios abruptos o puntos muertos.

Como se observa en la figura 3.6, los diferentes diseños del dado de extrusión producen diferentes patrones de flujo. Un perfil de longitud cero, como el que se muestra en la figura 3.6 (a), no sirve, lo mismo que el perfil alargado que se muestra en la figura 3.6 (b). Estos dos tipos de perfiles generan cambios abruptos en la trayectoria del flujo del material extruido, incluso producen puntos muertos en las esquinas donde circula el material. Estos cambios abruptos o puntos muertos producen perfiles o piezas no uniformes. Por el contrario, el diseño que se muestra en la figura 3.6 (c), ayuda a mantener el flujo laminar del material extruido, condición necesaria para obtener piezas o perfiles uniformes.

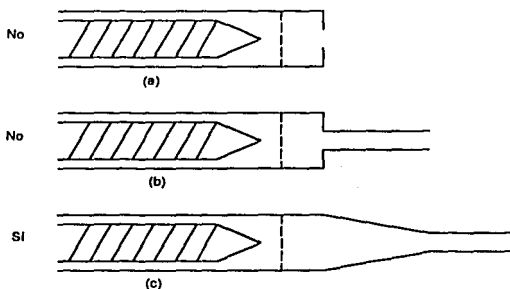


FIGURA 3.6 Patrones de Flujo en un Dado de Extrusión

El flujo laminar producido por el perfil con ahusamiento que se muestra en la sección c) de la figura 3.6 es a su vez un flujo convergente, en el cual existen fuerzas de tracción así como de corte, las cuales influyen de manera significativa en el comportamiento de los dados, como se ilustra en la figura 3.7. En el flujo paralelo se ve que las líneas de corriente son paralelas, es decir, un elemento de fluido se mantiene intacto en su trayectoria conforme avanza a lo largo del canal. En el caso de los flujos convergentes, las líneas de corriente convergen y el elemento de fluido se distorsiona debido al esfuerzo de tracción que se lleva a cabo, o sea, el material fundido o gomoso se estira a la vez que se hace más estrecho, al dirigirse hacia la salida.

### 3.2.2.2) EFECTOS DE LA ENTRADA DEL DADO

Si los esfuerzos de tracción son grandes, como en la figura 3.6 (a) y 3.6 (b), sobrepasan la resistencia a la tracción del material gomoso, de manera que las líneas de corriente se vuelven caóticas y discontinuas; la suavidad del flujo laminar se pierde completamente. El producto de extrusión que sale del dado será de forma irregular. Este fenómeno se conoce como fractura del extruido. Esto pasaría si se usara un dado como el de la figura 3.6 (a), el cual es simplemente un orificio con longitud cero. La sección paralela extendida, que se conoce como salida del dado, en la figura 3.6 (b) no sirve para remediar la situación; el daño ya se hizo a la entrada del dado.

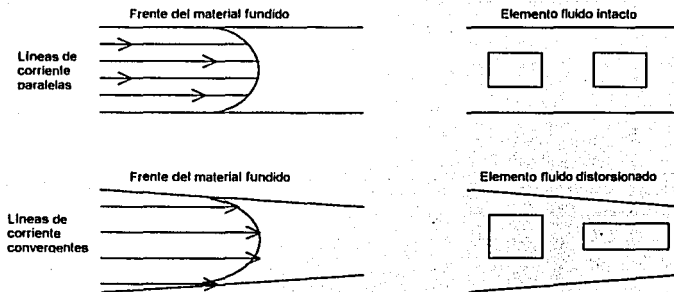


FIGURA 3.7 Flujos Paralelo y Convergente

En la figura 3.6 (c) se ve el fundamento del punto de vista correcto: la salida del dado es abusada. Los efectos de esto son:

- eliminar los puntos muertos de las esquinas y mantener con esto un recorrido térmico y un esfuerzo cortante estable;
- reducir los esfuerzos de tracción y con ello, minimizar también la distorsión de las líneas de corriente.

La salida alargada del dado es importante para estabilizar una disposición paralela de líneas bajas antes de la salida del dado. También aumenta el tiempo de tratamiento y eso ayuda a eliminar la memoria del proceso anterior. Tanto más suaves sean las líneas de corriente, cuanto más rápido se llevará a cabo la operación y el producto será mejor. Si no se previenen los efectos de la memoria, el resultado será probablemente un perfil extruido distorsionado.

### 3.2.2.3) INESTABILIDADES EN LA SALIDA DEL DADO

El defecto más común que se encuentra en la salida del dado se conoce como *piel de tiburón*. Consiste en un arrugamiento de la superficie sometida a extrusión. Este defecto también se debe a los esfuerzos de tracción, y se produce como se explica a continuación.

El material en estado gomoso, conforme avanza a lo largo del canal del dado tiene un perfil de velocidad, con una velocidad máxima en el centro y una velocidad cero en la pared. Conforme abandona los bordes del dado, el material de la pared tiene que acelerarse hasta la velocidad a la cual el producto sale del dado. Esto genera esfuerzos a la tracción, la superficie se rompe, generando el defecto visual. Como es de esperarse, los materiales de módulo bajo que tienen alto alargamiento son los menos afectados; los materiales estructurados, con alto contenido de materiales de relleno y de baja elasticidad tienen más fácilmente el defecto de piel de tiburón.

Si se favorecen las condiciones que causan la piel de tiburón, es decir, se vuelve excesiva la presión en el extrusor o disminuye la temperatura del dado, el defecto provoca una apariencia de grano grueso, que comúnmente se conoce como *cáscara de naranja*. Poco a poco la restitución de

los esfuerzos de tracción se exagera y el material sometido a extrusión en su totalidad de pronto se "retira". El resultado es el "abambamiento", llamado así porque la pieza sometida a extrusión se asemeja en apariencia al bambú, como se observa en la figura 3.8. El calentamiento extra del dado ayuda con frecuencia a remediar estos defectos, al relajar térmicamente los esfuerzos y disminuir la viscosidad.

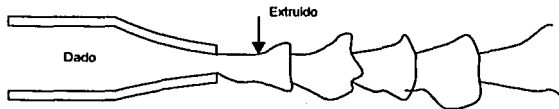


FIGURA 3.8 "Abambamiento" en un Dado

Una idea errónea pero común es que la piel de tiburón es una especie de fractura del extruido suave, y es cierto que la formación de la piel de tiburón, al incrementarse la velocidad del extrusor, puede estar seguida por el rompimiento completa de la pieza extruida que caracteriza a la fractura del extruido si aumenta más todavía la velocidad. Sin embargo, como se vió, los dos fenómenos tienen diferentes orígenes, de modo que la acción que se tome para prevenir uno de ellos puede contrarrestar el otro.

### 3.2.2.4) HINCHAMIENTO EN EL DADO

El hinchamiento en el dado es el efecto por el cual el compuesto de hule se hincha cuando sale del dado de extrusión. El resultado es una pieza que tiene dimensiones, no solo diferentes sino mayores, a las del orificio del dado. Así, una vainilla sometida a extrusión será de mayor diámetro al salir del dado, y una tubería será de pared más gruesa, es decir, se incrementa el diámetro externo y disminuye el diámetro interno. Ver figura 3.9. El hinchamiento en el dado es otro resultado de la componente elástica del comportamiento total que tiene el compuesto de hule en estado gomoso al someterse al esfuerzo. Esto lo provoca la recuperación de la deformación elástica cuando el material sometido a extrusión sale de la constricción del canal del dado y antes de que se enfríe.

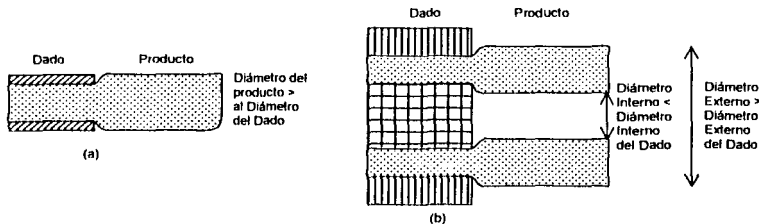


FIGURA 3.9 Hinchamiento en el dado de a) una vainilla y b) un tubo

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

El hinchamiento en el dado no es considerado como un defecto en el material extruido, porque, como se mencionó en el párrafo anterior, es causado por la recuperación elástica que ocurre en el material cuando abandona el orificio o la región anular del dado, debido a la relajación de los esfuerzos de tracción a que es sometido en su desplazamiento a lo largo del tornillo de extrusión.

Independientemente del análisis matemático que este fenómeno requiera para su explicación, puede asegurarse con base en la experiencia que el hinchamiento en el dado ocurrirá en todos los materiales poliméricos sometidos al proceso de extrusión, llámense compuestos de hule, llámense plásticos, etc; porque todos, en mayor o menor grado, presentan el fenómeno de la recuperación elástica después de que han sido sometidos a esfuerzos de tensión y/o tracción.

En el diseño de un dado de extrusión es importante considerar el efecto de este fenómeno, de manera que sus dimensiones sean las apropiadas para obtener el tamaño requerido del perfil extruido. En otras palabras, el dado de extrusión siempre deberá diseñarse de un tamaño menor al tamaño del perfil extruido que se quiere obtener. Que tanto menor, eso dependerá del material a extruir, naturalmente conociendo su comportamiento y la proporción de recuperación elástica que ha de tener.

### **3.3) PROBLEMAS COMUNES EN LA OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN**

Los complejos procesos de manufactura de artículos de hule rara vez se desarrollan libre de complicaciones o fallas. El proceso de extrusión no es la excepción. Entre los problemas de procesamiento más comunes se encuentran aquellos relacionados con: (1) la velocidad de salida o la cantidad de flujo del material; (2) la estabilidad dimensional del extruido; (3) la generación de calor; y, (4) la rugosidad o apariencia del extruido.

#### **3.3.1) VELOCIDAD DE SALIDA O CANTIDAD DE FLUJO**

Para un tamaño dado de extrusor los factores que tienen el mayor efecto sobre la velocidad de salida de material o la cantidad que fluye a través del equipo son:

- a) Diseño del tornillo
- b) Perfil de Temperatura
- c) Presión en la cabeza o zona de salida
- d) Formulación del compuesto

La salida puede variar por un factor de dos, dependiendo del diseño del tornillo. Los tornillos de alta masticación dan menores salidas.

El perfil de temperatura puede afectar la salida alrededor del 20% o más. Se debería hacer un estudio del perfil de temperatura para cada compuesto para establecer el perfil óptimo. Anterior a esto, deben de verificarse las zonas con control de temperatura para asegurarse que todos los componentes funcionan apropiadamente.

La velocidad de salida disminuye conforme se incrementa la presión en la cabeza. Es recomendable tener un sensor de presión en la cabeza del extrusor para monitorear el comportamiento de la presión. Los dados deben ser diseñados para provocar una presión mínima en la cabeza.

La velocidad de salida depende ampliamente de las propiedades del compuesto que está siendo procesado. Un compuesto diseñado acorde a las necesidades de proceso puede mejorar la velocidad de salida en un 10% o más. El tiempo de quemado o scorch del compuesto debe ser lo suficientemente alto para permitir la extrusión a una velocidad máxima del tornillo de extrusión.

### 3.3.2) ESTABILIDAD DIMENSIONAL

Se conoce como estabilidad dimensional a la capacidad que tiene el compuesto de hule para conservar las dimensiones originales del perfil extruido con las cuales salió del dado de extrusión. La estabilidad dimensional del extruido depende de varios factores, entre los cuales están:

- a) Equipo Transportador.- La fuerza o resistencia del compuesto de hule extruido es relativamente baja conforme sale del extrusor. El equipo de transporte, que incluye bandas transportadoras, líneas de inmersión, rodillos transportadores, guías, etc; deben ser diseñados apropiadamente. Los motores de impulsión deben ser de velocidad variable, con ajustes de velocidad gradual. Los esfuerzos aplicados al extruido deben ser constantes. El enfriamiento debe ser suficiente para bajar la temperatura del extruido y permitirle desarrollar su fuerza o "resistencia en verde" en forma normal.
- b) Control de Velocidad del Tornillo.- La velocidad de salida es casi directamente proporcional a la velocidad del tornillo. Si la velocidad del tornillo fluctúa o es variable, las dimensiones del extruido variarán debido a que la salida no es constante. La velocidad del motor de impulsión principal debe tener una variación menor al 1%. Deben instalarse sistemas de corriente directa para obtener ese nivel de control de velocidad. La energía eléctrica suministrada a los motores debe estar libre de oleadas o variaciones intempestivas. Deben instalarse medidores de velocidad sobre el panel de control para monitorear la exactitud de las velocidades de los diferentes motores. Debido a que las oleadas de corriente no son evidentes con los medidores, es deseable tener instalados registradores de velocidad.
- c) Alimentación.- La velocidad de salida cambiará si la alimentación hacia el extrusor fluctúa. Una tira uniforme de alimentación acoplado a un motor impulsor con ajuste preciso de velocidad, y un control de temperatura sobre la zona de alimentación mejora la uniformidad de la salida del extruido. Un ligero exceso de alimentación es mejor que uno escaso. El tamaño y número de tiras de alimentación debe ajustarse para mantener un pequeño exceso en la garganta de alimentación del extrusor.
- d) Control de Temperatura.- La salida fluctuará si el sistema de control de temperatura presenta variaciones en las zonas controladas. Cada controlador de temperatura debe ajustarse para mantener una temperatura uniforme de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . El operador debe verificar la temperatura periódicamente debido a que las válvulas solenoides y bombas pueden fallar.
- e) Compuesto.- La velocidad de salida y el hinchamiento en el dado son ampliamente dependientes del diseño y la uniformidad del compuesto. Si el flujo o el hinchamiento en el dado cambian después de iniciada una corrida o durante la misma, lo más probable es que haya cambiado el compuesto o hay una variación entre las cargas que se alimentan

al proceso de extrusión. La viscosidad Mooney y el tiempo de scorch deben determinarse, tanto para la alimentación como para el extruido.

### **3.3.3) GENERACIÓN DE CALOR**

El aumento de temperatura en el extruido puede resultar en una prevulcanización del mismo. Esto es afectado por la velocidad de extrusión, tipo de tornillo, presión en la cabeza del extrusor y la formulación del compuesto. El técnico en compuestos y el ingeniero de producción deben trabajar juntos para resolver este problema. Reducir la velocidad del tornillo, ajustar el perfil de temperaturas, emplear un tornillo de menor masticación, y reducir la restricción en el dado son algunas de las acciones a tomar por el ingeniero de producción para la solución del problema. Modificar el compuesto para reducir su viscosidad Mooney, adicionar inhibidores de la vulcanización y cambiar el sistema de curado son algunas de las alternativas a tomar por el técnico en compuestos para resolver el problema.

### **3.3.4) RUGOSIDAD O APARIENCIA DEL EXTRUIDO**

La rugosidad superficial del extruido, que no es causada por la prevulcanización del compuesto de hule, puede deberse a dos cosas: aire atrapado o masticación insuficiente. Ambas causas son relacionadas al diseño y la velocidad del tornillo. El ajuste del perfil de temperatura para incrementar la masticación, cambiar el diseño del tornillo para mayor masticación y el masticado adicional del compuesto en el mezclador son algunas soluciones a este problema. En algunos casos será necesario pulir la superficie interior del dado o incrementar su longitud para reducir la rugosidad superficial.



## 4) OPERACIÓN DE CALANDRADO



#### 4) OPERACIÓN DE CALANDRADO

La definición del verbo o acción de "calandrar" es la siguiente: "Presionar (tela, lienzo, papel) entre rodillos o placas de manera que se conviertan en una superficie lisa, plana, suave y delgada". Por lo tanto, en la industria huleira, una calandria es una máquina que continuamente produce hojas en una variedad de amplitudes, espesores y perfiles a partir de materiales elastoméricos, algunas veces incorporando elementos reforzantes como telas, alambres y otros. En su forma más simple, una calandria está ensamblada de manera muy similar a un molino de rodillos. Sin embargo, es diseñada con mayor cuidado, y construida precisamente con objeto de lograr un control efectivo del espesor del producto.

El objetivo del calandrado, al igual que en la extrusión, es preformar o configurar el compuesto de hule.

La forma básica de una calandria consiste de dos o más rodillos metálicos perfectamente maquinados y colocados sobre rodamientos y marcos resistentes. Al menos uno de los rodillos está equipado con tornillos de ajuste, que le permiten desplazarse de manera perpendicular, para controlar el espesor del material procesado. Dos rodillos adyacentes giran en direcciones opuestas entre sí de manera que forman un área de fricción o acción cortante (nip), que no es otra cosa que la abertura o espacio de separación entre el par de rodillos, por donde el material que está siendo procesado ha de pasar para ser comprimido o laminado en forma de hojas si así lo requiere el producto. Los rodillos están acoplados a reductores de velocidad que son impulsados por motores de velocidad constante o variable, con el fin de lograr las velocidades requeridas por el procesamiento de los materiales.

Las calandrias son fabricadas en diferentes configuraciones de los rodillos, ya sea horizontal o verticalmente, y en tamaños muy variados que van desde las que se emplean para laboratorios hasta enormes máquinas industriales. Sin embargo, las calandrias de tres rodillos con tamaños de rodillos de 24" (diámetro) x 68" (longitud) y las de cuatro rodillos en forma de "Z" o de "L" con rodillos de 28" x 78" son de las máquinas comúnmente empleadas para producción en masa de llantas, bandas, láminas y otros. Las calandrias de tres rodillos se emplean para la producción de artículos para uso mecánico. Las calandrias de cuatro rodillos también son empleadas en plantas de fabricación de llantas, éstas permiten la aplicación simultánea de hule químicos en ambos lados de las cuerdas de las llantas.

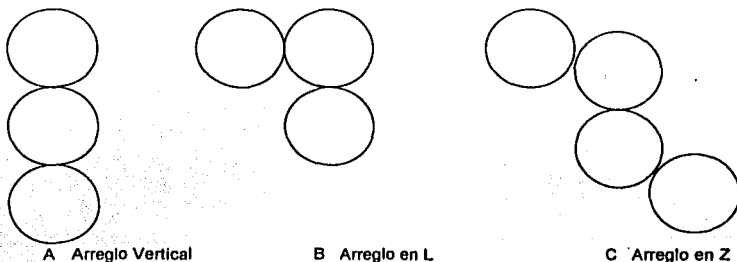


FIGURA 4.1 Arreglo de los rodillos de una Calandria

Dependiendo del número y el diseño de los rodillos será el proceso para el que sea útil determinada calandria, y que puede ser para el proceso de refinación, recubrimientos de materiales, obtención de perfiles, laminado o, impresón o relieves sobre materiales elastoméricos.

#### **4.1) REFINACIÓN**

Esta operación básica utiliza una calandria de dos rodillos con configuración horizontal o vertical. El material a procesar, ya sea en forma de tira o bolas, se alimenta por un lado de la abertura de los rodillos y es aplanado al pasar entre éstos, emergiendo así del otro lado de la abertura como una hoja que es jalada por algún medio manual o mecánico. Aunque también se usan ya las calandrias de tres rodillos para esta operación. Los espesores se controlan por medio de tornillos manuales o automáticos que desplazan a uno de los rodillos en forma perpendicular a la abertura, de manera que aumente o disminuya el espesor del producto.

#### **4.2) FRICCIÓN**

Este proceso implica el frotamiento o restregado de un compuesto elastomérico en un sustrato metálico o textil. Esto es, el compuesto de hule se refuerza con el material metálico o textil al incorporárselos.

Usualmente se emplea una calandria de tres rodillos en la que la lámina de hule se forma entre los rodillos superior y medio, mientras que la lámina resultante se fricciona simultáneamente dentro del sustrato entre los rodillos medio e inferior. En ésta operación los rodillos superior y medio pueden moverse a la misma velocidad superficial, pero los rodillos medio e inferior deben de correrse a diferente velocidad superficial de manera que el hule sea efectivamente incorporado con el sustrato que se esté aplicando en el rodillo inferior.

#### **4.3) RECUBRIMIENTO**

La operación de recubrimiento es similar a la que se describió para la operación de fricción, excepto que los rodillos medio e inferior corren a la misma velocidad superficial que la lámina de hule que se encuentra en contacto con el sustrato. Esto es totalmente cierto para una operación multipasos en donde el sustrato ha sido friccionado previamente. La operación de recubrimiento puede producir una capa muy gruesa o muy delgada dependiendo del requerimiento del producto. Generalmente las calandrias multipropósito, como las de tres rodillos, están equipadas con accesorios que permiten variar la velocidad entre los rodillos de manera que cualquier operación se pueda realizar en ellas.

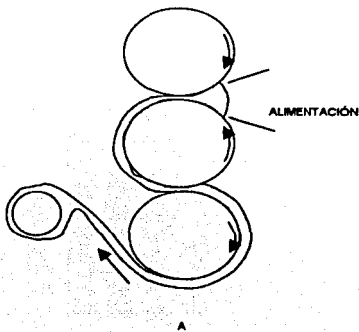
Una forma más compleja de calandrias para recubrimiento es el arreglo en "Z" o en "L" de aquellas de cuatro rodillos. Estas pueden aplicar simultáneamente un recubrimiento en ambos lados de la lámina de hule. En efecto, el rodillo 1 y el 2, a la vez que el rodillo 3 y el 4, forman pares en donde dos hojas de hule se producen. Las hojas son entonces laminadas sobre un sustrato entre los rodillos 2 y 3. Normalmente se incorporan en el diseño de las calandrias los accesorios necesarios para el control de espesores y anchuras de las hojas y laminados resultantes.

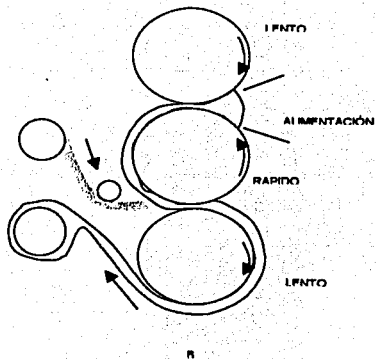
#### 4.4) PERFILES

Muchos productos de hule requieren componentes que no tienen una sección transversal rectangular. En tales casos, al menos uno de los rodillos de la calandria podría tener un accesorio de corte periférico sobre su superficie para producir la sección transversal deseada. Este método es particularmente útil cuando se requieren grandes producciones de este tipo pero que llegan a ser caros en términos de algún cambio de rodillo, o el diseño de uno nuevo cuando las secciones transversales requeridas son de varios tipos. En este caso, el rodillo de la calandria puede consistir de un mandril básico sobre el cual puede estar sujeta una división cilíndrica de acero, dentro de la cual se coloca el accesorio de corte del perfil requerido.

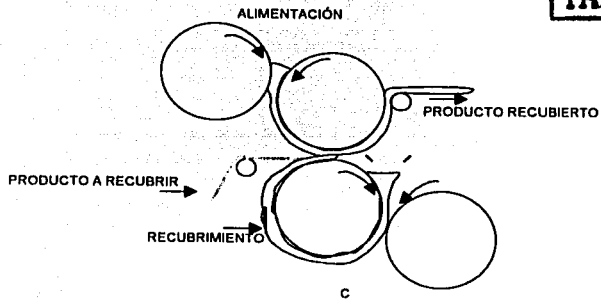
#### 4.5) RELIEVES

Algunos de los productos de hule se fabrican a partir de componentes que deben tener una superficie que, económicamente, no puede ser formada por un moldeo subsecuente. Un ejemplo es la suela de los tenis, cuya superficie no es lisa, tienen impresas ciertas figuras. El método para producir tales artículos puede ser similar al descrito en la operación de obtención de perfiles, en la que el diseño requerido es impreso sobre la hoja laminada de hule que pasa por la calandria por un rodillo "externo o ajeno" que tiene grabado una imagen a espejo del diseño que se persigue.





**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



**FIGURA 4.2 Operaciones Básicas de Calandrado**

- A) Laminado
- B) Fricción
- C) Recubrimiento

## **4.6) PROBLEMAS COMUNES EN EL PROCESO DE CALANDRADO**

Los problemas en el proceso de Calandrado obviamente varían con la clase de material que se está procesando y el tipo de equipo que se está usando. Sin embargo, hay muchos problemas comunes. Algunos de ellos y sus causas posibles se enuncian a continuación.

### **TABLA 4.1 CAUSAS POSIBLES DE MATERIAL FUERA DE ESPESORES**

- 1) Rodillos deformes
- 2) Desgaste excesivo en los cojinetes de los rodillos
- 3) Operación incorrecta de los dispositivos de reversa y acercamiento de los rodillos
- 4) Uso inapropiado del rodillo de paso o rodillo de torcimiento
- 5) Equipo de medición en malas condiciones

### **TABLA 4.2 CAUSAS POSIBLES DE FORMACIÓN DE BURBUJAS**

- 1) Control inadecuado de temperatura (rodillo muy caliente)
- 2) Banco de alimentación muy grande
- 3) Falta o uso inadecuado del rodillo punzante
- 4) Pre calentamiento inadecuado (agrietamiento excesivo)
- 5) Lámina muy gruesa

### **TABLA 4.3 CAUSAS POSIBLES DE HOYOS EN LAS LÁMINAS**

- 1) Banco de compuesto de hule o muy pequeño o muy grande. Debe tener un banco rodante.
- 2) Control inadecuado de temperatura
- 3) Pre calentamiento inadecuado (agrietamiento insuficiente)

### **TABLA 4.4 CAUSAS POSIBLES DE PREVULCANIZACIÓN**

- 1) Control de temperatura inadecuada (rodillo muy caliente)
- 2) Banco de compuesto de hule muy grande
- 3) Abertura de rodillos muy grande
- 4) Velocidad de rodillos muy alta
- 5) Pre calentamiento en molinos muy prolongado

### **TABLA 4.5 CAUSAS POSIBLES DE MATERIAL O MUY SECO O MUY PEGAJOSO**

- 1) Control inadecuado de temperatura (rodillo muy caliente o muy frío)
- 2) Temperatura de alimentación inapropiada

### **TABLA 4.6 CAUSAS POSIBLES DE EXCESIVO DESPERDICIO O RETRABAJO**

- 1) Las cuchillas no está colocadas en un lugar apropiado
- 2) Control de temperatura inapropiada al inicio de la corrida
- 3) Guías defectuosas

### **TABLA 4.7 CAUSAS POSIBLES DE TELA QUEBRADA O DEFORME**

- 1) Coronas de rodillos inapropiadas

- 2) Control inapropiado de coronas
- 3) Presión de rodillo muy baja
- 4) Tensión inapropiada de la tela
- 5) Operación inapropiada del tornillo de acercamiento de los rodillos

**TABLA 4.8 CAUSAS POSIBLES DE LA CAIDA DEL RECUBRIMIENTO**

- 1) Control inapropiada de la temperatura (temperatura de rodillo o muy baja o muy alta)
- 2) Corona inapropiada o control inapropiado de la corona
- 3) La presión del tornillo de acercamiento de los rodillo es insuficiente
- 4) La tela o el recubrimiento está frío

**TABLA 4.9 CAUSAS POSIBLES DE FRICCIÓN INAPROPIADA**

- 1) Velocidad de rodillos inapropiada
- 2) Temperatura de rodillos inadecuada

De las causas posibles de la mayoría de los problemas de la operación de calandrado, el que más se repite es el control de la temperatura de los rodillos. Por lo tanto, este punto es el que hay que vigilar en extremo en la operación de calandrado.



## 5) OPERACIÓN DE VULCANIZACIÓN

## 5) OPERACIÓN DE VULCANIZACIÓN

### 5.1) INTRODUCCIÓN

El primer método comercial de vulcanización fue atribuido a Charles Goodyear. Su proceso, calentamiento de hule natural con azufre, fue primero usado exitosamente en Springfield, Massachusetts, en 1841. Thomas Hancock usó esencialmente el mismo proceso alrededor de un año después en Inglaterra. Desde esos primeros días, el proceso y resultados de los artículos de hule han sido enormemente mejorados. Además del hule natural, muchos hules o elastómeros sintéticos han sido introducidos en el mercado. Adicionalmente, muchas sustancias diferentes al azufre se han incorporado como componentes de los sistemas de curado (vulcanización).

Dentro de la serie de procesos que sigue un compuesto de hule para la fabricación de artículos útiles, al final de ella se encuentra la etapa de vulcanización, tan importante como las anteriores.

La vulcanización es un proceso irreversible durante el cual un compuesto elastomérico pasa de un estado termoplástico a un estado termofijo mejorando sus propiedades elásticas. Esto ocurre mediante una reacción química de reticulación en su estructura molecular. El procesamiento de compuestos elastoméricos vulcanizables se divide en dos etapas. La primera consiste en el preformado o configuración del material mientras se encuentra todavía en su estado termoplástico (o en verde), mediante alguno de los procesos mencionados anteriormente (extrusión, moldeado, calandrado, etc.). La segunda etapa es la conversión química del material preformado hasta su estado final que es termofijo, que es propiamente el proceso de vulcanización.

La vulcanización se derivó del descubrimiento de que ciertos polímeros naturales podían tratarse en presencia de calor y azufre, obteniendo así materiales con propiedades únicas de elasticidad, elongación, razonable estabilidad térmica e impermeables al agua y al aire.

Una vez que la reacción química toma lugar durante la vulcanización, el proceso es irreversible. Por lo tanto, puede ser considerado como un cambio permanente en el material elastomérico.

Las reacciones químicas que ocurren durante la vulcanización del compuesto elastomérico son muchas y muy complejas.

**El objetivo de la vulcanización, como proceso, es convertir el compuesto de hule preformado en un artículo con propiedades útiles, en el que el estado viscoso/termoplástico del hule, característico en la etapa de preformado, se anula y adopta el estado elástico/termofijo en el que las propiedades ya no podrán alterarse.**

Los métodos y los equipos usados para la vulcanización de artículos de hule son variados y diversos, como se verá más adelante.

### 5.2) DEFINICIÓN Y TEORÍA DE LA VULCANIZACIÓN

El término **vulcanización** es generalmente aplicado a materiales elastoméricos o gomosos. Estos materiales se retraen fuertemente hasta su forma original (aproximadamente) después de una gran deformación impuesta mecánicamente.



La **vulcanización** puede ser definida como sigue:

- a) Un proceso que incrementa las fuerzas retroactivas y reduce la magnitud de la deformación permanente después de remover las fuerzas de deformación. De este modo, la vulcanización incrementa la elasticidad mientras que disminuye la plasticidad. Esto se realiza mediante la formación de "ligaduras o enlaces cruzados" en la estructura molecular, proceso conocido como reticulación, y que da lugar a una red molecular muy fuerte.
- b) Es un proceso químico de formación de redes moleculares unidas por la inserción de enlaces cruzados entre las cadenas de polímeros. Los generadores de enlaces cruzados pueden ser un grupo de átomos de azufre en una cadena corta, un solo átomo de azufre, un enlace carbono-carbono, un radical orgánico polivalente, un grupo de iones, o un ion metálico polivalente, todos ellos conocidos como agentes vulcanizantes. El proceso normalmente es efectuado por calentamiento del compuesto de hule (mezclado con agentes vulcanizantes) en un molde bajo presión.
- c) Es un proceso químico de curado de los compuestos de hule. Es la conversión del hule, o de los compuestos de hule, desde un estado predominantemente plástico (moldeable), hasta un estado totalmente elástico (fijo), mediante la formación de enlaces cruzados en tres dimensiones.
- d) Es un proceso irreversible durante el cual un compuesto elastomérico (de hule) es convertido, mediante un proceso de reticulación, desde un material termoplástico hasta un material termofijo, habiendo mejorado sus propiedades elásticas.

Como se puede apreciar en las diferentes definiciones dadas arriba, existen varias acepciones para el término **vulcanización**, convergiendo todas ellas a la misma conclusión, y que desde mi perspectiva es la siguiente:

**Vulcanización.**- Es un proceso químico irreversible<sup>1</sup> empleado para curar los compuestos elastoméricos, durante el cual se dan una serie de reacciones químicas que concluirán en la unión de una cadena o cadenas del compuesto elastomérico con un átomo o grupo de átomos del agente vulcanizante, conocido como enlaces o ligaduras cruzadas o puentes, obteniendo así un material con propiedades elásticas superiores a las del compuesto en su fase original. Como se observa, básicamente la vulcanización es un proceso de reticulación. Este proceso por lo general requiere la aplicación de calor para poder efectuarse.

**Reticulación.**- Formación de enlaces químicos de acuerdo a las diferentes direcciones del espacio a lo largo de una polimerización, y que da lugar a una red sólida y compacta.

El proceso de fabricación o de obtención de un artículo de hule se divide en dos etapas. La primera etapa consiste en la formación o configuración del producto mientras que el material elastomérico se encuentra todavía en el estado termoplástico, en el cual se puede moldear de acuerdo a las necesidades. La segunda etapa consiste en la conversión química (vulcanización) del material preformado hasta su estado final termofijo, en el cual el moldeado ya no será posible por las características de elasticidad del compuesto.

---

<sup>1</sup> Actualmente ya existe el fenómeno que podría llamarse la Desvulcanización, que consiste precisamente en atacar los puentes o uniones del agente vulcanizante con el elastomero, de manera que éste último retorne a su forma o estructura química original.

## 5.2.1) QUIMICA DE LA VULCANIZACIÓN

En el proceso de la vulcanización hay dos reacciones básicas de mayor importancia comercial. Una de ellas implica la incorporación o adición de azufre, o compuestos de azufre, a un compuesto elastomérico, promovida por medio de agentes catalizadores apropiados y condiciones internas apropiadas tales como pH y otros factores similares, y soportada por la adición de energía en forma de calor.

La otra reacción básica es creada por el ataque de radicales libres en contra de los polímeros insaturados (elastómeros), resultando la unión de las cadenas poliméricas (enlaces cruzados) en enlaces carbono-carbono. En este caso, se requiere energía para producir los radicales libres, la cual debe ser suministrada para alcanzar el resultado deseado. Aunque la vía común para la generación de los radicales libres es la descomposición química de ciertos peróxidos, hay mecanismos tales como la radiación de electrones en donde los radicales libres pueden generarse sin calentar la estructura polimérica del elastómero, o, en teoría, adicionando algún ingrediente al compuesto elastomérico para el propósito de la vulcanización.

También es importante entender que el proceso de la vulcanización se verifica conforme a la ecuación de Arrhenius:

$$\ln k = -(E/R) (1/T) + \ln A$$

donde:

k = constante de la velocidad de reacción

E = energía de activación

R = constante de los gases

T = temperatura absoluta

A = constante

En esencia, la ecuación anterior establece que mientras mayor sea la cantidad de calor (o energía), la velocidad de reacción del proceso de vulcanización será mayor. Debido a que la mayoría de los métodos comunes de vulcanización implican la adición de energía térmica, puede establecerse que mientras mayor sea la temperatura de vulcanización, el proceso se verificará con mayor rapidez. En la figura 5.1 se ilustra en forma gráfica la ecuación de Arrhenius dada anteriormente para una reacción típica de vulcanización.

Aunque en la reacción química que derivó en el descubrimiento del fenómeno de la vulcanización no se encontraba ningún elemento conocido como acelerador, las reacciones comerciales actualmente incluyen aceleradores de varios tipos, de modo que la reacción se verifique en menor tiempo. (Aceleradores).

Inicialmente, la reacción de la vulcanización se realizó calentando azufre elemental a una concentración de 8 partes por 100 partes de elastómero o partes de hule, abreviado como phr, durante 5 horas a 140°C. La adición de óxido de zinc redujo el tiempo a 3 horas. En contraste, los aceleradores, a concentraciones tan bajas como 0.5 phr redujeron el tiempo de 1 a 3 minutos. Como resultado, la vulcanización de los compuestos de hule con azufre y sin aceleradores no tiene

mayor importancia comercial. Una excepción es el uso de 30 o más phr de azufre, con un poco o nada de aceleradores, para producir artículos moldeados de hule duro llamado ebonita.

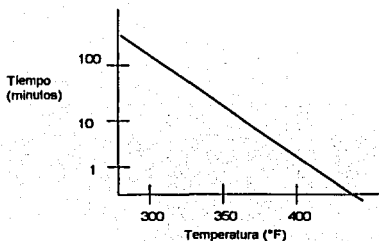
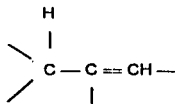


FIGURA 5.1 Representación gráfica de la Ecuación de Arrhenius y de la Vulcanización de un compuesto de hule

Aunque la vulcanización sin azufre no tiene relevancia comercial, su química ha sido objeto de mucha investigación y estudio, y ha sido controversial. Algunos investigadores afirman que el mecanismo de reacción es promovida por radicales libres; y otros afirman que el mecanismo de dicha reacción es iónico.

La vulcanización con el azufre como agente vulcanizante, es el método más ampliamente usado. Para muchas aplicaciones, es la única técnica de reticulación que, de una manera práctica, ofrece la seguridad requerida, tanto en el procesamiento, construcción y preformado, antes de que se presente la formación irreversible de la estructura vulcanizada. Este agente se emplea para vulcanizar hule natural (NR), hule isopreno sintético (IR), hule estireno-butadieno (SBR), hule nitrilo (NBR), hule butilo (IIR), hule clorobutilo (CIIR), hule bromobutilo (BIIR) y el hule etileno-propileno-dieno (EPDM). La molécula reactiva para todos estos elastómeros puede ser representada por:



El punto de insaturación, en éste caso el doble enlace, es el punto de inicio de la reacción y el punto que servirá para que el agente vulcanizante forme el puente de unión o la reticulación. Como se ha concluido en los diferentes estudios, los puntos de insaturación existentes en los elastómeros son los que permiten el curado con el azufre como agente vulcanizante, y por lo tanto, son los responsables de la vulcanización.

Típicamente, una fórmula o receta del sistema de vulcanización para alguno de los elastómeros mencionados arriba contiene:

COMPONENTE	PHR
Óxido de Zinc	2 - 10
Ácido Graso (Esteárico)	1 - 4
Azufre	0.5 - 4
Aceleradores	0.5 - 2

El óxido de zinc y el ácido graso son activadores de la vulcanización. El ácido graso y el óxido de zinc forman una sal que origina complejos con los aceleradores y los productos de la reacción formados entre los aceleradores y el azufre.

Frecuentemente, se usan mezclas de aceleradores al diseñar un sistema de curado. Con una mezcla de dos diferentes tipos, cada acelerador activa al otro y se puede obtener una mejor reticulación. Las mezclas de aceleradores del mismo tipo dan resultados intermedios o promedios.

Los diferentes tipos de aceleradores imparten al elastómero o compuesto de hule, características de vulcanización que difieren con respecto a la resistencia al scorch (efecto o fenómeno de prevulcanización), y a la proporción de reticulación.

### 5.3) ENERGÍA TÉRMICA PARA LA VULCANIZACIÓN

Existe un fenómeno físico que debe ser contemplado en la aplicación práctica de la vulcanización térmica, y que es la transferencia de calor. Del mismo modo como la reacción química es un fenómeno dependiente del tiempo y relacionado con la temperatura, el proceso de calentamiento del objeto a vulcanizar también depende de un número de factores que impactan la velocidad del incremento de la temperatura, así como de la uniformidad de la vulcanización a través del objeto. Básicamente, el proceso de vulcanización depende de la aplicación de calor a una cierta temperatura por un cierto periodo de tiempo<sup>2</sup>.

Debido a que la energía térmica es la más comúnmente empleada en la promoción de la vulcanización, los métodos por los cuales ésta es aplicada al material elastomérico, constituye una parte importante de la tecnología del hule.

#### 5.3.1) MÉTODO DEL VAPOR SATURADO

Por mucho, la energía térmica más común empleada en la vulcanización por lotes o cargas (batch) ha sido el vapor saturado. El vapor saturado es fácilmente generado dentro de la planta y es de un contenido energético muy alto. Puede ser empleado directamente sobre el objeto a vulcanizar, por calentamiento directo, o empleando un horno o panel de calentamiento por calentamiento indirecto. También se emplea para calentar directamente los moldes que se utilizarán para darle forma al objeto a vulcanizar, el cual vulcanizará por calentamiento indirecto a través de las paredes del molde. Este es el caso de las llantas y cámaras para automóvil.

<sup>2</sup> La reacción de Vulcanización es exotérmica y para que se efectue en el seno de un compuesto de hule no debe adicionarse energía térmica. Sin embargo, se efectuaría muy lenta a temperatura ambiente. Por lo tanto, para aumentar la velocidad de reacción se aplica energía térmica al sistema y lograr que la vulcanización sea práctica a nivel industrial.

Aunque el vapor no es totalmente libre de oxígeno, el contenido es tan pequeño que a elevadas temperaturas no oxida el elastómero. Por lo tanto, puede ser considerado como un ambiente inerte para el proceso de vulcanización o curado.

El vapor saturado tiene una ventaja mayor, su temperatura está directamente relacionada a la presión en el proceso de vulcanizado. Dada una presión de vapor saturado se tiene establecida la temperatura a la cual será suministrado, o a la inversa, dada la temperatura del vapor saturado se tiene su presión. La presión sobre el artículo a vulcanizar es deseable en el proceso térmico de la vulcanización. Produce artículos más compactos, evita la volatilidad de varios componentes dentro del compuesto elastomérico y/o la vaporización de los subproductos de la vulcanización.

Con respecto a la capacidad de transferencia de calor, puede asumirse que el vapor saturado tiene un coeficiente infinito de transferencia de calor, que es su habilidad para calentar la superficie del producto.

Por lo tanto, el método del vapor saturado es el mejor para la mayoría de las aplicaciones.

### **5.3.2) MÉTODO DEL GAS CALIENTE**

El aire caliente es el siguiente método de energía térmica más común usado en la vulcanización, aunque su uso es generalmente dirigido a procesos continuos. El aire caliente debe ser usado solamente con polímeros donde la oxidación no inhibirá el proceso de curado o en donde éste no se degrade. Este generalmente tiene un coeficiente de transferencia de energía bajo. Sin embargo, el aire puede ser calentado prácticamente a una temperatura mucho mayor que el vapor. Como el coeficiente de transferencia de calor es dependiente del gradiente de temperatura entre el medio y la superficie del producto, muchas de las ineficiencias del aire caliente se pueden disminuir simplemente tomando en cuenta su capacidad de calentamiento.

El aire caliente es mucho más fácilmente contenido y reutilizado que el vapor saturado. El proceso puede ser fácilmente venteado para remover contaminantes. El producto es limpio, libre de contaminaciones y manchas de agua. El aire caliente se comprime fácilmente. Puede proporcionar una presión elevada para la vulcanización, aunque el uso de presiones altas no es una práctica muy común.

Un método esencialmente idéntico al del aire o gas caliente es el del nitrógeno caliente. Debido a que el aire es aproximadamente 80% de nitrógeno, desde la perspectiva de eficiencia y desempeño, hay una pequeña diferencia entre estos dos. La razón principal para el empleo de nitrógeno en el proceso de vulcanización es prevenir la oxidación de elastómeros sensibles, proporcionar una fuente de gas comprimido para sistemas de curado que operan a presiones elevadas, y en algunos casos, alcanzar mayores temperaturas de operación en donde los efectos de la oxidación pueden limitar la aplicación del aire caliente. Hay algunas aplicaciones similares en donde otros gases más baratos, tal como el dióxido de carbono, pueden emplearse por razones similares.

### **5.3.3) MÉTODO DEL FLUIDO DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

Ha habido una variedad amplia de fluidos y pseudo fluidos de transferencia de calor usados en el proceso de vulcanización. Estos deben ser totalmente inertes a los compuestos elastoméricos sobre el rango completo de temperaturas de operación del proceso. Esto implica

también que el material no debe absorberse en el producto, no debe haber reacciones superficiales, y ningún efecto lateral deberá de efectuarse. Además, el medio en si no debe sufrir ningún cambio durante el procesamiento continuo. Debe retener sus propiedades a través de todo el ciclo.

Algunos de los materiales más exitosos utilizados para la transferencia de calor en el proceso de vulcanización son las mezclas eutélicas de sales inorgánicas, ciertos glicéridos orgánicos, y partículas inorgánicas diminutas fluidizadas por aire caliente, el cual actúa como pseudo líquido seco en la mayoría de sus propiedades. Estos materiales tienen coeficientes de transferencia de calor moderados. Generalmente son empleados en procesos continuos de vulcanización, más comúnmente pero no exclusivamente, no presurizados, y proporcionan incrementos de temperatura razonablemente rápidos y velocidades de vulcanización moderadas.

Tanto los glicéridos y la sales eutélicas tienen límites específicos de temperatura de operación que deben ser observados. Son caracterizados adicionalmente por su solubilidad lo cual facilita su remoción del producto una vez que se ha completado el proceso. Las partículas fluidizadas, que pueden operar a temperaturas mucho mayores, deben ser removidas del producto por medios físicos.

Los productos vulcanizados por este método deben ser postlimpiados. Existen pérdidas apreciables de los fluidos de transferencia durante el proceso de vulcanización. Esta pérdida puede tener un impacto mayor sobre los costos operacionales.

#### **5.3.4) MÉTODOS DE TRANSFERENCIA DIRECTA DE ENERGÍA**

Estos no son necesariamente más efectivos. El calentamiento por rayos infrarrojos es un proceso industrial común. Es una técnica de calentamiento superficial. La energía es impartida hacia la superficie del producto mediante la absorción de la energía emitida en la cercanía del espectro infrarrojo. No obstante, la absorción es dependiente de la superficie del material. Debido a que muchos productos elastoméricos son negros, estos métodos parecen ser ideales. Sin embargo, el uso de calentamiento infrarrojo actualmente se ha limitado, debido a que la distribución de energía alrededor del objeto debe ser muy uniforme para que sea efectivo. En segundo lugar, la contaminación ambiental ha influenciado en su eficiencia debido a que los residuos de la vulcanización tienden a contribuir a mermar su desempeño.

El calentamiento por microondas es una energía totalmente diferente. Las microondas, siendo de mucho mayor frecuencia y menor longitud de onda, es un método de calentamiento másico, opuesto al método de calentamiento superficial. El calentamiento depende de la respuesta del compuesto de hule. Si tiene características polares o propiedades de semiconductor, entonces el producto se calentará muy eficientemente. En cambio, si el compuesto de hule es deficiente en estas propiedades, el producto tendrá deficiencias en el calentamiento.

Existe otro método que ha recibido mayor atención en estos días, y es la energía ultravioleta (UV). Este no es precisamente un proceso. Tanto el método como el compuesto se diseñan con materiales que reaccionan químicamente en presencia de energía UV y resulta la vulcanización.

## 5.4) MÉTODO Y EQUIPO PARA LA VULCANIZACIÓN

### 5.4.1) METODO

Independientemente del método de vulcanización aplicado, como se vió en la sección anterior, del equipo empleado y del compuesto y producto a vulcanizar, la operación de vulcanización requiere que se satisfagan las condiciones mínimas necesarias en tres variables muy importantes, para obtener con éxito un producto vulcanizado de buena calidad. Estas tres variables son: la temperatura, la presión y el tiempo, y que pueden considerarse como variables o parámetros externos por que no son inherentes al compuesto de hule.

Aunque la reacción de vulcanización no requiere de energía térmica para que se efectúe, ésta se adiciona al sistema para aumentar su velocidad. El parámetro empleado para la cuantificación y control de la cantidad de energía que se suministra al sistema en reacción es la temperatura, ya sea del producto o del fluido de intercambio de calor, lo cual justifica su importancia en el proceso de vulcanización.

El proceso de vulcanización propicia la formación de gases y vapores dentro del producto que se está vulcanizando, debido a que algunos de los ingredientes del compuesto de hule se gasifican a las temperaturas de vulcanizado. Por ésta razón el producto debe estar sometido a presión de manera que se evite la formación de burbujas o ampollas en su interior por la liberación de gases. La presión debe ejercerse sobre la superficie del cuerpo que se está vulcanizando, y por lo común se emplea aire a alta presión, aunque pueden existir otros métodos de ejercer presión.

Algunos productos de hule no necesitan estar sometidos a altas presiones para alcanzar un buen término de vulcanización. Incluso pueden vulcanizarse a presión atmosférica. Otros, sin embargo, requieren estar sometidos a altas presiones durante el proceso de vulcanización; éste es el caso de las llantas y cámaras para llantas, que literalmente, tienen que mantenerse infladas dentro del molde para poder vulcanizarse y en caso contrario el producto que se obtiene no alcanza el curado requerido y es considerado como desperdicio.

El tercer parámetro que afecta el proceso de vulcanización es el tiempo durante el cual el producto está sometido a las dos variables anteriores: temperatura y presión. Si el tiempo es muy largo el producto puede sufrir el fenómeno de reversión (sección 2.6.2.1) y la degradación en varias de sus propiedades. Si el tiempo es muy corto el producto que se obtiene puede estar en una etapa de vulcanización inapropiada y algunas de sus propiedades serán prematuras. Por lo tanto, el tiempo de curado debe ser óptimo y en equilibrio con las cualidades requeridas en el servicio del producto en cuestión. El tiempo de vulcanización también debe verse desde el punto de vista de la economía y la productividad de una máquina. A mayor tiempo de vulcanizado, menor productividad de la máquina y con riesgo de obtener un producto degradado. A menor tiempo de vulcanizado, mayor productividad y con riesgo de obtener un producto con propiedades prematuras. Como se observa, debe buscarse un punto de equilibrio entre la productividad y las propiedades del producto vulcanizado.

Al descubrir el fenómeno de la vulcanización no se conocían las condiciones bajo las cuales ocurría éste, sin embargo, conforme se estudió se entendió que las tres variables externas que se comentan en los párrafos anteriores son las que lo afectan y determinan la calidad del producto, además de las variables inherentes (variables internas) al compuesto de hule, que son: concentración del agente vulcanizante, aceleradores, activadores, entre otros.

En síntesis, para que el proceso de vulcanización se efectúe en el compuesto de hule, y por ende en el artículo o producto que se fabricó con este compuesto, además de los sistemas de

aceleración, activadores y agente vulcanizante que se le incorporaron, se requiere someterlo a altas temperaturas bajo determinadas condiciones de presión durante un periodo de tiempo.

#### **5.4.2) EQUIPO**

El equipo comercialmente disponible para realizar la vulcanización de productos elastoméricos se divide en tres clases, como a continuación se indica:

- a) Vulcanización Batch o por cargas
- b) Vulcanización Semicontinua
- c) Vulcanización Continua (VC)

##### **5.4.2.1) EQUIPO PARA VULCANIZACIÓN BATCH O POR CARGAS**

El equipo para vulcanización batch, como su nombre lo indica, es el tipo de equipo en donde los artículos preformados se colocarán en charolas o bandejas, enroscados en cacerolas o pailas, enrollados sobre carretes, o preparados y soportados cuidadosamente de otra manera, de tal forma que puedan ser colocados dentro de dicho equipo para su vulcanización.

Estos equipos para vulcanización son comúnmente autoclaves, o recipientes de vapor a presión, similar a una olla de presión doméstica. Estos autoclaves son diseñados y comercializados en una amplia variedad de tamaños y formas, pero generalmente pueden ser cilíndricos en forma horizontal, con 25 o más pies de longitud y 4 o más pies de diámetro. Los verticales son normalmente grandes de diámetro y cortos de altura. Estas unidades son diseñadas para presiones de vapor de agua que en proceso generen temperaturas de 350 °F o más.

Las formas extruidas vulcanizadas de este modo deben ser soportadas sobre charolas o bandejas formadas para evitar deformación de la sección transversal mientras ocurre el proceso de vulcanización. Esto evitará que el producto vulcanizado forme una curvatura permanente. Las longitudes de los productos se adaptan al tamaño de las bandejas y a la longitud del equipo disponible.

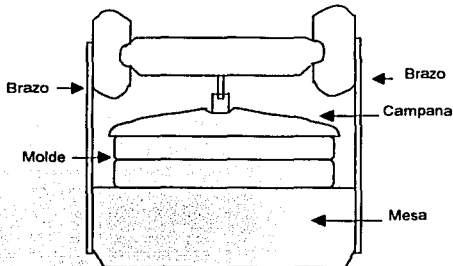
Los productos como las mangueras son procesados en dos formas dentro del equipo para vulcanizado. Muchas mangueras para baja presión al igual que las mangueras hidráulicas son preparadas para el vulcanizado cubriéndolas exteriormente con una recubierta de plomo, la cual formará un molde continuo. Esta manguera recubierta con el plomo es enrollada sobre un carrete y se coloca dentro del equipo para vulcanizar. Después de que se completa el curado de la manguera la funda o vaina de plomo que se formó es retirada. Algunos cables se producen también de esta manera.

El proceso más comúnmente empleado para el curado de mangueras a baja presión y con refuerzos textiles es el proceso abierto con vapor. En este proceso la manguera es holgadamente enroscada en una paila, con solamente una o dos capas de profundidad. Las pailas son apiladas con espaciadores entre ellas y colocadas dentro del equipo para el curado. El tiempo de residencia requerido dentro del equipo vulcanizador para lograr el curado varía ampliamente, pero el rango típico se encuentra entre 45 minutos a una hora.



El autoclave es el equipo más importante y el más empleado para vulcanización por batch o lotes actualmente. Las cajas térmicas que emplean aire caliente son usadas para vulcanizar algunas especialidades, pero son muy lentas. Los ciclos típicos de curado en estas pueden exceder las 24 horas.

Las llantas y cámaras emplean el método batch para curar o vulcanizar. La cura se realiza para cada pieza en moldes individuales, los cuales se instalan para su uso sobre prensas (que pueden ser tipo Platina o de algún otro diseño), y son calentados en su interior por medio de vapor saturado (figura 5.2 y 5.3). Para su vulcanización, el producto ya preformado se coloca dentro del molde caliente; el calentamiento del producto se realiza en forma indirecta mediante el mecanismo de conducción al estar en contacto con las paredes del molde hasta que alcanza su estado de vulcanización.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 5.2 Prensa Tipo Platina para Vulcanización de las Cámaras para llantas (Vista frontal)

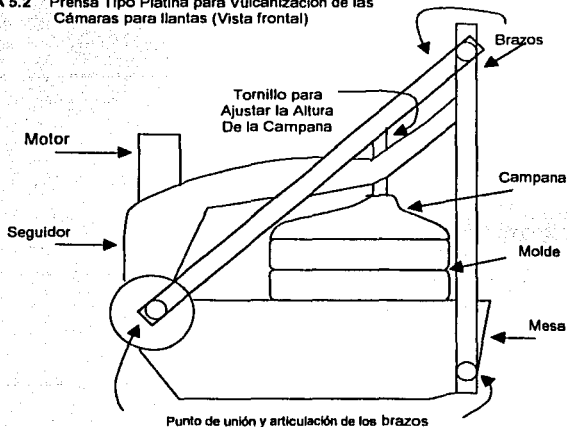


FIGURA 6.3 Prensa Tipo Platina para la Vulcanización De las Cámaras para llantas (Vista lateral)

#### **5.4.2.2) EQUIPO PARA VULCANIZACIÓN SEMICONTINUA**

En esta clasificación, hay dos tipos de equipos que se deben considerar:

- 1) Prensa rotativa
- 2) Método de Pultrusión (Extrusión pulsada)

La prensa rotativa es esencialmente un molde en operación para un producto que es mucho mayor en longitud que el molde. Las platinas calientes de esta prensa trabajan ininterrumpidamente a lo largo de toda la longitud del producto hasta que este queda completamente vulcanizado de extremo a extremo. Este proceso es comúnmente empleado para la vulcanización de bandas transportadoras y similarmente para otros productos que se requieren en presentaciones largas.

El método de pultrusión o extrusión pulsada es similar al método de moldeo de la prensa rotativa. Su uso ha sido limitado a la fibra de vidrio y materiales plásticos empleados como reforzantes de los elastómeros. Se emplea en Europa y Japón para producir formas continuas, especialmente cables y mangueras.

En cada uno de estos métodos semicontinuos, el calor para el proceso es transmitido hacia el producto a partir de la superficie metálica del molde. Estas superficies del molde se calientan ya sea por medio de vapor o resistencias eléctricas.

#### **5.4.2.3) EQUIPO PARA VULCANIZACIÓN CONTINUA (VC)**

Existe una variedad más amplia de métodos para vulcanización en continuo (VC) que procesos batch o semicontinuos. La VC, curiosamente quizás, no ha desplazado al proceso batch. Una de las razones principales para esto es que los sistemas VC no son tan versátiles como los métodos batch. Los sistemas de VC han avanzado mucho en los últimos años, principalmente en la manufactura de productos como las mangueras. Sin embargo, un método de VC es ampliamente usado en el procesamiento de dos productos.

La producción de cables ha disfrutado por muchos años de los beneficios del método de VC. Al igual que éste, la esponja extruida es otro de los productos que emplea la VC.

Los equipos y métodos de VC comercialmente disponibles son los siguientes:

- 1) Vulcanizado por tubo de vapor
- 2) Vulcanizado por líquido o gas presurizado
- 3) Vulcanizado en túnel de aire caliente
- 4) Horno de microondas continuo
- 5) Curado por medio de líquido o pseudolíquido
- 6) Vulcanizado por haz de electrón

De los seis métodos o equipos de VC, algunos son diseñados principalmente para vulcanizar bajo presión, mientras que otros son adecuados para vulcanización a presión atmosférica. Los métodos presurizados son comúnmente usados en la producción de alambres eléctricos y cables, y ocasionalmente se usan para otros artículos.

### **1) Vulcanizado por tubo de vapor**

El tubo de vapor tiene todos los atributos del autoclave para el método batch. La mayor diferencia es que éste recipiente es mayor en tamaño, a partir de 150 pies de longitud, es operado a presiones más altas y las altas temperaturas inducen a una vulcanización más rápida. Las condiciones de operación más comunes para el curado es de 250 psi de vapor saturado con 406 °F de temperatura. La gran mayoría de cables son producidos por este método, y un pequeño porcentaje de mangueras se fabrican de este modo.

### **2) Vulcanizado por líquido o gas presurizado**

Similar al método anterior, éste método es aplicado principalmente en la industria de los cables eléctricos, y emplea gas inerte caliente en lugar de vapor. El gas comúnmente usado es el nitrógeno. La ventaja principal de éste sistema es que se pueden lograr temperaturas más altas a presiones de operación menores, o temperaturas independientes de la presión. Esto representa ventajas económicas, principalmente en el área de consumo de energía. En este sistema existen dos formas de calentar el producto. Uno de ellos usa calentamiento infrarrojo, ya sea elementos infrarrojos o por calentamiento externo del tubo para obtener emisión infrarroja. Aquí, el nitrógeno es usado como lecho presurizado. El otro método utiliza un sistema de calentamiento y barrido externo, en donde el nitrógeno es calentado y circulado a una velocidad muy alta dando una transferencia de calor muy eficiente desde el gas hacia el producto.

### **3) Vulcanizado en Túnel de Aire Caliente**

Los perfiles extruidos, tanto celular como denso, o su combinación, son comúnmente vulcanizados en forma continua y a presión atmosférica. El método más común, por su origen, simplicidad y versatilidad es el túnel de aire caliente. El túnel continuo es fabricado en secciones y acondicionado con transportadores de banda a todo lo largo para conducir el producto a través de todo este proceso. Los túneles de aire caliente se encuentran desde 10 ft para algunos productos de silicón, hasta 150 ft o más. Este método resulta atractivo para productos de esponja particularmente, donde se pueden lograr altas producciones de manera muy rápida. Muchos productos densos se pueden producir por éste método, particularmente aquellos de pequeña sección transversal. El proceso es simple y el producto resulta con muy buena calidad. Han habido mejoras a este método para incrementar la productividad y la eficiencia. Algunas de ellas son la introducción de propulsores de aire de alta velocidad, la incorporación de técnicas de calentamiento directo por infrarrojo, y el uso de la energía de microondas.

### **4) Hornos de Microondas Continuo**

Estos sistemas se identifican como autosuficientes, pero en la práctica rara vez se emplean de esa forma. El equipo para vulcanización por microondas únicamente cumple las necesidades de distribución de energía de microondas, seguridad y comunicación general. Invariablemente, este método se aplica en combinación con otro, tal como el aire caliente, para proporcionar un sistema completo de vulcanización. Esto se requiere así por la velocidad con la que esta energía calienta el compuesto elastomérico y no alcanza el estado

de curado completo. Para alcanzarlo, la temperatura del producto debe retenerse por tiempo adicional en un ambiente de temperatura controlada. Por lo tanto, deben emplearse métodos complementarios. Este método también es útil para mejorar la capacidad de otros sistemas de vulcanización empleando éste como método de precalentamiento.

#### **5) Curado por medio de Líquido o Pseudolíquido**

En éste método, el producto a vulcanizar es pasado o transportado a través de un líquido o pseudolíquido caliente. Las pailas o sumideros empleados para este fin son más cortos de longitud que los poco mencionados túneles de aire caliente debido al más alto efecto de transferencia de calor. Este método requiere de la limpieza del producto una vez que ha sido vulcanizado. Algunos productos como las mangueras son limpiados fácilmente, pero otros presentan muchas dificultades para su limpieza. Los dos métodos más comunes para la limpieza de los productos vulcanizados son los baños de sales fundidas y los lechos fluidizados de pequeñas esferas de vidrio, fluidizadas por aire caliente.

#### **6) Vulcanizado por Haz de Electrón**

Los vulcanizadores por haz de electrón, aunque han penetrado algo el mercado como la tecnología, no han logrado una penetración significativa en el campo de procesamiento del hule. Este método es comúnmente referido como vulcanización por radiación. Las razones por las que este método no ha proliferado su uso se relacionan con su costo de instalación y su operación. En primer lugar el generador del haz de electrón es muy caro, y en segundo lugar requiere cubrir las condiciones de seguridad necesarias debido a la radiación. La vulcanización por radiación depende del voltaje y potencia del acelerador. El voltaje de aceleración determina la profundidad de la penetración del haz en el producto, mientras que la potencia se relaciona con la cantidad de material que puede ser procesado por hora. La aplicación económica de los vulcanizadores por haz de electrón actualmente se limita a cierta especialidad de productos de propiedades excepcionales demandados por la industria militar y aérea, tal como alambres especiales, cables y tubos de contracción. Debido al alto costo que implican estos equipos, normalmente no se emplean a nivel industrial a menos que la calidad y cantidad del producto lo requieran.

### **5.5) PROBLEMAS COMUNES EN EL PROCESO DE VULCANIZADO**

Los problemas en el proceso de Vulcanizado obviamente varían con la clase de material que se está procesando y el tipo de equipo que se está usando. Sin embargo, hay muchos problemas comunes. Algunos de ellos y sus causas posibles se enuncian a continuación.

**TABLA 5.1 CAUSAS POSIBLES DE AIRE RETENIDO ENTRE EL PRODUCTO Y EL MOLDE**

- 1) Los conductos de derrame de aire de las cavidades del molde son insuficientes
- 2) Los conductos de derrame de aire de las cavidades del molde están obstruidos
- 3) Alguno de los componentes de la fórmula del compuesto aumenta el flujo y causa retención de masas de aire
- 4) Presión de moldeo insuficiente

**TABLA 5.2 CAUSAS POSIBLES DE AGRIETAMIENTOS SUPERFICIALES EN EL PRODUCTO**

- 1) Toda la superficie del producto no hace contacto casi simultáneo con la superficie del molde
- 2) El producto sin vulcanizar tiene muescas profundas o rebordes prominentes
- 3) Después del ensamble final el producto sin vulcanizar se deforma

**TABLA 5.3 CAUSAS POSIBLES DE BURBUJAS O AMPOLLAS EN LA SUPERFICIE DEL PRODUCTO**

- 1) Aire retenido durante alguna etapa del proceso (Mezclado, Extrusión, etc.) o ensamble
- 2) Las temperaturas y/o presiones de proceso no son las adecuadas
- 3) Alimentación insuficiente en la extrusora
- 4) Presión insuficiente en la etapa de ensamble
- 5) Humedad o líquidos volátiles en el seno del compuesto o en su superficie

**TABLA 5.4 CAUSAS POSIBLES DE RAJADURAS O NUDOS**

- 1) Exceso de vulcanización
- 2) Temperatura de vulcanización muy alta o tiempo de curado prolongado
- 3) Composición del sistema de vulcanización inapropiada
- 4) Lubricante insuficiente en los moldes
- 5) Moldes mal hechos
- 6) Forma de sacar el producto del molde

**TABLA 5.5 CAUSAS POSIBLES DE POROSIDAD EN EL PRODUCTO**

- 1) Humedad o sustancias volátiles contenidas en los ingredientes del compuesto
- 2) Al usar disolventes en los productos no se permite el sacado completo de los mismos
- 3) Dimensiones insuficientes de los productos en los moldes
- 4) Presiones internas insuficientes
- 5) Curado insuficiente o presencia de gases disueltos y ocluidos que se dilatan al cesar la presión externa



# CONCLUSIONES

## 6) CONCLUSIONES

Revisando los objetivos generales y específicos planteados como parte de este trabajo, se asume que se cubren en su totalidad. Todos estos temas son muy amplios y únicamente se incluyó parte de lo básico para cada uno, tratando de ser lo más claro posible para un rápido entendimiento del lector. Los temas aquí tratados pueden ser estudiados con mayor detalle y profundidad en la bibliografía especializada, de la cual parte se incluye como referencias en este trabajo.

A manera de corolario se exponen a continuación **las conclusiones de éste reporte.**

Recordando que el objetivo guía que enmarca el presente reporte es: "Difundir el tema del Procesamiento del Hule en la carrera de Ingeniería Química en la FES Zaragoza, y mostrar que ésta rama industrial es parte de la Industria Química, y que por lo tanto, el Ingeniero Químico encuentra en ella áreas de oportunidad para su desarrollo"; y aclarando que aunque la **Industria del Hule** no posee dentro de sus instalaciones los tanques reactores típicos: cilindros verticales u horizontales encaquetados equipados con sistema de agitación, con bombas de descarga y/o alimentación, varias tuberías de entrada y salida, intercambiadores de calor, etc., todo esto característico de una planta de proceso en donde se efectúan reacciones químicas para la transformación de materiales; ésta se considera como parte de la **gran Industria Química**, por las siguientes razones:

- 1) **Las operaciones unitarias y fenómenos de transferencia que ocurren en sus procesos son las comunes de la industria química y de los cuales los más relevantes son: flujo de sólidos y fluidos, transferencia de calor;**
- 2) **Transforma las materias primas en productos útiles mediante la aplicación de reacciones químicas.**

La Industria del Hule está incluida dentro de la industria del procesamiento de materiales y forma parte del sector secundario de las actividades económicas de nuestro país.

De igual manera, se asevera que sin duda **éste material apoyará a la difusión de los temas aquí expuestos dentro de la carrera de Ingeniería Química en nuestra escuela**, y por lo tanto, el Ingeniero Químico que egresa de aquí conocerá que la Industria Hulería es otra área que debe adoptar como parte de su campo de acción, y en la cual puede encontrar oportunidades de desarrollo como profesional capacitado en el área del procesamiento de los materiales.

Revisando los temas expuestos a lo largo de éste reporte, mismos que son los diferentes procesos, operaciones y fenómenos de transferencia que ocurren en la Industria del Procesamiento del Hule, es suficiente para mostrar que ésta es parte del campo de acción del Ingeniero Químico, como se resume a continuación.

- 1) **Compuesto de Hule (tema expuesto en la Parte I) ; Se vió la serie de ingredientes que integran los compuestos de hule, su función y efecto en el mismo; todos ellos son productos químicos. Por lo tanto, como profesional capacitado en el área química, un Ingeniero Químico puede ser el profesional que realice el diseño o formulación de un compuesto de hule, ya que puede conocer los productos químicos.**
- 2) **Operaciones de Mezclado, Extrusión y Calandrado (temas expuestos en la Parte II): Se vió los fenómenos fisicoquímicos presentes en éstas operaciones, todos ellos relacionados con el flujo de sólidos y fluidos y la transferencia de**

calor. El Ingeniero Químico está capacitado en éstas áreas, por lo tanto, entiende cada uno de los fenómenos presentes en dichas operaciones.

- 3) **Vulcanización (tema expuesto en la Parte II)**: Se vió que la vulcanización es un fenómeno que se verifica por una serie de reacciones químicas, cuyo objetivo es transformar el compuesto de hule en un material termofijo altamente elástico. Se vió que intervienen varios factores como son el tiempo, temperatura, presión y concentración. Por lo tanto, un fenómeno completamente químico. El Ingeniero Químico tiene la capacitación necesaria para entender éste fenómeno, ya que su formación le permite y exige conocer el fenómeno de las reacciones químicas.

En síntesis y para puntualizar el espíritu de éste reporte, se enuncia un pasaje publicado por los Maestros A. Valiente y R. P. Stivalet en su libro titulado "El Ingeniero Químico, ¿Qué Hace?": "Otra importante industria química actual es la del caucho (vocablo que también se emplea para identificar a los compuestos de hule). El hule, que era conocido por los indios de América, adquirió importancia comercial con la vulcanización, que logró Charles Goodyear en 1839 y gran difusión cuando J. B. Dunlop, en 1889, inventó los neumáticos...".

Así pues, como Industria Química, La industria del hule puede emplear y dar oportunidades de desarrollo a los profesionales de la Ingeniería Química.

## **6.1) PERSPECTIVAS DEL INGENIERO QUIMICO EN LA INDUSTRIA HULERA**

Las actividades que un Ingeniero Químico puede realizar dentro de la industria de los productos de hule, o los puestos o funciones que puede desempeñar, son varios. Similar a cualquier otra industria, en ésta existen actividades de índole diversa. Desde puestos como los de supervisor de producción, diseñador de compuestos o formulista, auditor de aseguramiento de calidad, etc., hasta puestos ejecutivos como gerente de producción, o de aseguramiento de calidad, entre otros. Posiblemente cada una de estas actividades pueda tener candidatos con conocimientos ajenos a esta rama industrial, incluso con grado académico menor. Lo que hace al Ingeniero Químico un candidato atractivo para ocupar estos puestos es el valor agregado que puede darle a cada uno de ellos, que acorde a los tiempos actuales es requisito indispensable. Sin embargo, no es suficiente el hecho de ser Ingeniero Químico, hay que mostrar que efectivamente se puede dar valor agregado a estas actividades. Algunas de ellas son:

- 1) Supervisor de Producción
- 2) Diseñador de Compuestos o Formulista
- 3) Auditor o Inspector de Calidad en Laboratorio o Proceso
- 4) Asistencia Técnica a Clientes
- 5) Ingeniería y Diseño
- 6) Gerente de Área o Departamento (Producción, Calidad, etc.)

1) Supervisor de Producción.- Aplicar sus conocimientos técnicos para administrar y controlar las condiciones de Producción en la planta, que implica varios aspectos. Esto significa



coordinar las actividades relacionadas con la mano de obra directamente involucrada y aplicada al proceso de fabricación, a la cual tiene que capacitar en el piso del proceso cuando sea necesario; así mismo verificar condiciones de operación de los equipos y de los procesos, que van desde el mezclado hasta la vulcanización, pasando por las diversas operaciones de preformado.

2) Diseñador de Compuestos o Formulista.- Dentro de la industria de los productos de hule, una de las áreas en las que es muy importante el trabajo del ingeniero químico, por su formación y conocimientos, es la sección de la formulación de los compuestos para los diferentes productos fabricados; ya que requiere trabajo, tanto de laboratorio por las pruebas y diseños que se deben realizar a nivel micro, como de planta por la verificación de los resultados obtenidos ya a nivel macro, y vigilar y guiar el desarrollo del proceso, otorgar disposiciones para el proceso en marcha cuando se requiera, etc.

La actividad del desarrollo o la formulación de los compuestos de hule exige que se tenga conocimientos sobre los componentes que se pretenden incluir dentro de alguna fórmula, desde el elastómero a emplear como base del compuesto, hasta las cargas y aditivos a incluir en el compuesto, de manera que las características y procesabilidad del producto a obtener se puedan predecir hasta cierto punto. Este requisito lo satisface ampliamente el ingeniero químico. El elastómero base que se emplea para formar un compuesto de hule es un polímero con características elásticas. Las cargas y los aditivos que se incorporan al elastómero para darle determinadas características son productos químicos. El ingeniero químico posee las bases tanto en el conocimiento de los polímeros como de los productos químicos usados como cargas y aditivos. Por lo tanto, se concluye que el ingeniero químico es un buen candidato para ocupar el puesto de formulista o técnico en compuestos en una planta de productos de hule.

El proceso de vulcanización propiamente dicho es una reacción química, o si se quiere ser más estricto, consta de una serie de reacciones químicas, en las que un agente vulcanizante reacciona con un elastómero previamente acelerado o activado. El diseño y selección de los sistemas de aceleración y vulcanización, también es labor para un ingeniero químico.

3) Auditor o Inspector de Calidad en Laboratorio o Proceso.- Aplicar conocimientos y técnicas para analizar la calidad de las materias primas suministradas por los proveedores, para determinar su estatus contra las especificaciones establecidas. Así mismo, auditar los procesos y los productos terminados.

4) Asistencia o Asesoría Técnica a Clientes.- Proporcionar asesoría técnica a los clientes establecidos, sobre uso y aplicaciones de los productos fabricados, así como su manejo e instalación. Impartir cursos y talleres a los mismos relacionados con cuestiones técnicas del producto.

5) Ingeniería y Diseño.- Desarrollar nuevos productos, así como nuevas aplicaciones de los ya existentes. Optimizar los procesos productivos de las plantas; desarrollar la ingeniería básica o de detalle de nuevos procesos, o mejoras a los ya existentes.

6) Gerente de Área o Departamento (por ejemplo de Producción o de Aseguramiento de Calidad).- Niveles ejecutivos de las empresas de la industria del hule que se encargan precisamente de administrar las actividades en las diferentes áreas, ya sea de producción, de aseguramiento de calidad, de ingeniería, de compras, ventas, etc.

Considero que los profesionistas de nuestra área, lo mismo que nos desarrollamos en las áreas de la industria de procesos químicos, de alimentos, farmacéutica, del papel, del petróleo y la petroquímica, entre otras, también encontramos áreas de oportunidad en la industria de los productos de hule, las cuales deben ser aprovechadas.

## **6.2) AREAS DE OPORTUNIDAD DENTRO DE LA INDUSTRIA DEL HULE**

Las áreas o ramas de la industria de los productos de hule en las que el Ingeniero Químico puede prestar sus servicios y hallar desarrollo profesional son varias, y básicamente depende de los productos a elaborar. Así, a continuación se mencionan algunas de las áreas de oportunidad:

- 1) Llantas o neumáticos
- 2) Mangueras
- 3) Bandas de transmisión
- 4) Bandas transportadoras
- 5) Rodillos de imprenta
- 6) Piso para renovación de llantas
- 7) Rodillos de la industria textil
- 8) Adhesivos
- 9) Cámaras para llantas de todo tipo de vehículos
- 10) Diversos artículos industriales
- 11) Piezas o partes automotrices
- 12) Calzado industrial, suelas y botas
- 13) Defensas marinas
- 14) Impermeabilizantes
- 15) Modificadores de plásticos
- 16) Sustitutos de plásticos

Como puede observarse, el campo de ocupación y aplicación es amplio y diverso. Esta lista no es exhaustiva, y pueden encontrarse aún más áreas.

## **6.3) SUGERENCIAS PARA HABLAR DEL HULE EN LA CARRERA DE INGENIERIA QUÍMICA EN FES ZARAGOZA**

Como se ha visto a lo largo del presente reporte, hay muchos temas dentro de la Industria del Procesamiento del Hule que están directamente relacionados con algunos módulos de la carrera de Ingeniería Química en FES Zaragoza.

Desde mi perspectiva personal considero que los módulos o asignaturas de la carrera de Ingeniería Química dentro de los cuales se puede tratar de manera teórica el tema del Procesamiento del Hule son los siguientes:

1) Tronco Común: En las materias de Química, sobre todo Química Orgánica, podría abordarse los tipos de reacción que ocurren en el proceso de vulcanización.

2) Análisis de Procesos: Podría tratarse como una introducción al proceso de elaboración de artículos de hule, ya sea en la materia de Química Industrial o en el Laboratorio y Taller de Proyectos teórico de éste módulo. Así mismo podría mencionarse el comportamiento de los compuestos de hule o elastómeros básicos en la sección de fluidos no newtonianos de la asignatura de Fenómenos de Transporte.

3) Manejo de Materiales: Específicamente podría incluirse algo relacionado con los compuestos de hule en la asignatura de Separación Mecánica y Mezclado, precisamente por el proceso u operación de Mezclado.

4) Manejo de Energía: Sería interesante ver el tema del Procesamiento del Hule desde el punto de vista térmico, específicamente dentro de la asignatura de Transferencia de Calor, dado que es un proceso que involucra este fenómeno en sus diversas etapas.

5) Diseño de Procesos: Considero que es importante observar el proceso de vulcanización como un fenómeno químico que implica una serie de reacciones químicas, y sería interesante estudiarlo desde el punto de vista de la cinética química. Por lo tanto, la asignatura que podría absorber esta tarea es la de Ingeniería de Reactores.

En fin, éstas son algunas propuestas personales, de manera que las futuras generaciones de Ingenieros Químicos conozcan de manera formal el tema tratado en el presente reporte.

Sugerir actividades experimentales para éste tema requiere de un análisis más cuidadoso, ya que probablemente se requiera de algún equipo empleado a nivel industrial para realizar los trabajos.

También sería recomendable programar visitas estudiantiles a plantas industriales que se dedican a la elaboración de artículos a base de compuestos de hule, de manera que se conozca físicamente el o los procesos involucrados.



# BIBLIOGRAFIA

## 7) BIBLIOGRAFIA

- 1) Arnold Edward, "Ciencia y Tecnología del Caucho", Editorial CECSA, México, 1967.
- 2) Jett C. Arthur, "Polymers for Fibers and Elastomers", "Rubber Processing Through Rheology", American Chemical Society, U.S.A., 1984.
- 3) Sperling L.H., "Introduction to Physical Polymer Science", 2ª edición, John Wiley & Sons, U.S.A., 1992.
- 4) Billmeyer Fred W. Jr., "Textbook of Polymer Science", John Wiley & Sons, U.S.A., 1984.
- 5) De Cárcer M. Vidal, "Tratado Moderno de las Industrias del Caucho", 2ª edición, España, 1963.
- 6) Heinisch K.F., "Dictionary of Rubber", Applied Science Publishers Ltd., London, 1974.
- 7) Long Harry, "Basic Compounding and Processing of Rubber", American Chemical Society, Rubber Division, U.S.A., 1985.
- 8) Kirk R.E., Othmer D.F., "Encyclopedia of Chemical Technology", 4ª edición, John Wiley & Sons, U.S.A., 1992.
- 9) Mark F.H., Bikales N.M., "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", John Wiley & Sons, U.S.A., 1988.
- 10) Morton - Jones D.H., "Procesamiento de Plásticos", Editorial Limusa, México, 1993.
- 11) Wiltcoff Harold A., Reuben Bryan G., "Productos Químicos Orgánicos Industriales, Tecnología, Formas y Usos", Vol. 2, Editorial Limusa, México, 1987.
- 12) Mayorga Vargas José Luis, "Memorias del Curso Ciencia y Tecnología del Hule", Nivel I, Grupo Hulero Mexicano, ESQIE IPN, México, Marzo de 1997.