

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE FORROS DE CAUCHO  
PARA MOLINOS DE BOLAS  $\Phi 14$  X 41 PIES PARA  
MOLIENDA HÚMEDA DE MINERALES**

**INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**ELABORADO POR:**

**LUIS ALBERTO ESCOBAR ANTEZANO**

**PROMOCIÓN 1992 - II**

**LIMA - PERÚ**

**2014**

## TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO .....	ii
PROLOGO .....	5
CAPITULO I.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	7
CAPITULO II.....	11
2. EL CAUCHO.....	11
2.1. El caucho natural, su obtención y compuestos. ....	13
2.1.1. Caucho natural.....	13
2.1.2. Obtención del caucho natural .....	17
2.1.3. Compuestos del caucho natural. ....	19
2.2. Cauchos sintéticos y compuestos.....	29
2.2.1. Buna S o caucho artificial (SR).....	29
2.2.2. Caucho Buna-N.....	30
2.2.3. Poliisopreno sintético (IR).....	30
2.2.4. Otros Tipos de caucho sintético industriales.....	31
2.3. Vulcanización del caucho. ....	39
2.3.1. Proceso de vulcanización del caucho natural .....	40
2.4. Propiedades mecánicas del caucho (elastómero).....	50
2.4.1. Resistencia mecánica.....	52
2.5. Usos del caucho.....	85
2.5.1. Usos del caucho natural .....	86
2.5.2. Usos del caucho sintético.....	86
2.5.3. Formas industriales comunes de fabricaciones con caucho. ....	89
2.5.4. Usos frecuentes en automóviles y maquinaria.....	90

2.5.5.    Uso del caucho como revestimiento interior (blindaje) del casco o tambor de molinos giratorios.....	90
CAPITULO III.....	94
3.    ASPECTOS TEORICOS DE MOLIENDA DE MINERALES.....	94
3.1.    Consideraciones Generales.....	94
3.2.    Reducción de tamaño.....	96
3.2.1.    Escala de Reducción en una máquina de molienda .....	98
3.2.2.    Medición y clasificación de las partículas (granos) de minerales reducidas de tamaño. ....	98
3.3.    Trituración y molienda. ....	103
3.3.1.    Trituración (fracturación / quebrantamiento). ....	104
3.3.2.    Granulación, pulverización o molienda fina.....	104
3.3.3.    Molienda húmeda o seca.....	106
3.3.4.    Circuito de molienda cerrado o abierto .....	107
3.3.5.    Equipos del proceso de pulverización.....	111
3.3.6.    El molino cilíndrico de bolas. ....	117
3.3.7.    Parámetros de operación de los molinos de bolas y Factores que Influyen sobre la Capacidad y la Marcha: .....	123
3.3.8.    Parámetros principales que caracterizan a un molino de bolas cilíndrico tubular .....	132
3.3.9.    Método de Seleccionar el Tipo de Molino Necesario .....	135
3.3.10. Sugerencias para la buena marcha de los Molinos cilíndricos de Bolas .....	136
3.4.    El molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41'para molienda fina y húmeda, de descarga libre o por rebalse natural del mineral; .....	136
CAPITULO IV .....	139
4.    DISEÑO DE LOS FORROS DE CAUCHO.....	139
4.1.    Términos, definiciones y Consideraciones. ....	139
4.2.    Parámetros a usar en la selección de los forros de caucho.....	141
4.3.    Selección de los forros utilizando fórmulas y ábacos. ....	141
4.4.    El revestimiento de caucho del molino de bolas cilíndrico con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre del mineral. ....	143
4.5.    Montaje. ....	145
CAPITULO V .....	150
5.    FABRICACION DEL BLINDAJE DE CAUCHO Y COSTO DE FABRICACION.....	150

5.1.	Proceso de fabricación de forros de caucho para el molino 14x41 .....	152
5.2.	Costo de fabricación de los forros de caucho para el molino 14x41 .....	153
CAPITULO VI .....		155
6.	EVALUACION DE LA APLICACIÓN DEL FORRADO DE CAUCHO.....	155
6.1.	Influencia del revestimiento de caucho sobre la capacidad, eficiencia y economía de molienda.....	155
6.2.	Influencia de la separación y altura de las barras y de la velocidad de rotación en la capacidad y eficiencia. ....	156
6.3.	Influencia del desgaste del revestimiento del caucho sobre la capacidad, eficiencia y economía de molienda.....	157
6.3.1.	Diagramas de desgaste.....	157
6.3.2.	Consideraciones iniciales para el cálculo de desgaste de los forros	158
6.6.3.	Influencia del desgaste en la capacidad y calidad de molienda. ....	161
6.4.	Amortiguación del ruido .....	161
6.5.	Costos de instalación, recambio y tiempos improductivos .....	162
6.6.	Determinación del ahorro por aplicación del blindaje de caucho en el molino de bolas.....	162
6.7.	Evaluación costo beneficio .....	164
6.7.1.	Retorno de la Inversión (ROÍ) .....	164
6.7.2.	Periodo de Devolución.....	164
CONCLUSIONES .....		164
RECOMENDACIONES .....		168
BIBLIOGRAFIA.....		169
PLANOS		
APENDICE		

## PROLOGO

En tiempos actuales de calidad total, todos los que realizamos mantenimiento debemos asimilar la tecnología moderna disponible que nos permita un grado de confiabilidad y seguridad de las máquinas y equipos de una planta de producción. En un mundo tan competitivo en costos, calidad y eficiencia en el caso particular de planta de molindo en minería nos obliga a implementar un sistema de revestimiento o forros de caucho del molino que nos permita reducir los días de paralización, reducir el consumo de energía, y el costo total de e los forros de caucho.

El presente informe de suficiencia, se desarrolla en 6 capítulos:

Capítulo I se expone la problemática y los objetivos.

Capítulo II se explica el origen de los compuestos de caucho natural, su composición química, propiedades químicas y físicas. También se enfocan las propiedades mecánicas importantes que se consideran para el diseño del blindaje de caucho, así como de sus ensayos, según normas ASTM. Se informa sobre el vulcanizado del caucho natural y su importancia en la fabricación de forros sometidos a fuerte desgaste e impacto.

Capítulo III se menciona los procesos de reducción de tamaño del mineral fundamentalmente el chancado, la molienda gruesa, y sobre todo la molienda fina (pulverización) y húmeda de mineral que en la actualidad se realiza en el molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41', para molienda fina y húmeda, de descarga libre o por rebalse natural del mineral, que es usado en las plantas de beneficio en las unidades mineras de nuestra nación; destacando la importancia de controlar la molienda con la medición del tamaño de partículas de mineral que ingresan y salen del molino, así como la cantidad de humedad, para optimizarla. Se explican los

principios mecánicos que fundamentan los molinos de tambor giratorio cilíndrico de bolas. También se definen el rendimiento mecánico y parámetros principales de operación que influyen sobre la capacidad y marcha. Se muestran sus partes fundamentales, mencionando el tipo de forro de acero que tenía el molino antes de su reemplazo por el forro de caucho. Luego, se mencionan las características e índices fundamentales de operación del molino.

Capítulo IV se diseña el forro de caucho, manteniendo la geometría del forro de acero anterior, manteniendo la capacidad y eficiencia mecánica de molienda, según curva empírica de relaciones geométricas de forros planos o placas y barras elevadoras y curvas de relaciones geométricas que influyen en el consumo mínimo de energía.

Capítulo V se muestra el proceso de fabricación del forro de caucho formulado según requerimientos de las empresas mineras. Luego se da la relación de medidas, volúmenes y pesos de los diferentes componentes del forro completo del molino.

Capítulo VI se evalúa la aplicación del forrado de caucho, mostrando las ventajas técnicas y económicas en comparación con los forros de acero que se empleaba en los inicios de su operación.

## **CAPITULO I**

### **1. INTRODUCCIÓN**

El molino de bolas cilíndrico con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose) del mineral, que actualmente funciona en las diferentes plantas de beneficio de las Compañías Mineras Nacionales de la gran minería; requiere una protección en todas las superficies internas del casco, tapas y muñones, en las cuales hacen contacto la pulpa que contiene agua de mar o agua dulce y los elementos molturadores, para que resista el desgaste, impacto y corrosión; y de este modo preserve la estructura cilíndrica del casco, las tapas y los muñones, principalmente.

Para ello se montaron originalmente los forros (blindaje) de acero, sin embargo constantemente se rajaba el casco y tapas, luego para superar este problema se importaron forros de caucho de USA que originaban inconvenientes tales como demora de cerca de un año de la llegada del producto, altos costos, dimensiones imprecisas que tomaba tiempo extra para adaptarlos y montar los forros sin lograr un óptimo sellado. Luego se decidió importar el blindaje de caucho de Suecia, pero no se pudo superar con esto los inconvenientes. Finalmente a comienzos de los 90 se pudo diseñar y fabricar, a la medida, el revestimiento o forros de caucho de fabricación nacional los que están dando excelentes resultados.

El uso Industrial del revestimiento de caucho en los molinos, se inició a principios de la década del sesenta en Europa y desde entonces se ha difundido por todo el mundo y a inicios de la década del 80 se importan los primeros blindajes de caucho para molinos de bolas de remolienda húmeda en Huanzala Mitsui del Perú con resultados satisfactorios, pero a inicios del 90 hay una tendencia a diseñar y fabricar revestimientos de caucho aprovechando la experiencia de la industria peruana en fabricación de productos de caucho con materia prima de Malasia,

Tailandia, Indonesia y Singapur ; el negro de humo de Venezuela, Méjico y del Perú de la Brea y Pariñas ; también otros reforzantes de Agregados Calcáreos.

Para aprovechar las propiedades del caucho es preciso variar el diseño del revestimiento de acero de tipos tan conocidos como el de resalto a traslape, el ondulado, de resaltos biselados, etc.

Desde el comienzo los revestimientos de caucho consistieron en placas o planchas y barras elevadoras. La selección de factores tales como grosor de placa, ancho y alto de las barras elevadoras, perfil de las barras, todas las distancias entre las barras y placas, el diámetro del molino, los elementos molturantes y el tamaño de la carga afectan directamente el desgaste, la capacidad y el rendimiento.

Según la experiencia basada en más de 22 años en la aplicación de revestimientos de caucho y con datos recopilados de más de 150 molinos instalados para diversas aplicaciones, se ha ideado un método para diseñar el revestimiento de caucho. Este método nos permite seleccionar los parámetros del revestimiento de caucho, adecuado a las condiciones de operación, e indicar como afectan a los resultados del funcionamiento económico al variar estos parámetros con sistemas computarizados.

Este revestimiento de caucho es el más versátil a disposición de la industria extractiva minera. Puede instalarse también para molienda secundaria, y remolienda, molinos de bolas de descarga con parrillas por rebalse o periférica.

Con la experiencia adquirida en este campo, se han diseñado matrices versátiles y principalmente un tipo de caucho que garantiza excelentes resultados para ese tipo de trabajo.

#### **Formulación del Problema.**

La necesidad de bajar los costos de procesamiento de molienda del mineral; dependen fundamentalmente de los gastos de mantenimiento y reemplazo de los forros del casco cilíndrico y tapas, así como del consumo de energía de los molinos de bolas cilíndricos con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose), cuyas operaciones de molienda fina y remolienda, son de alto costo comparado con las operaciones de molienda primaria y de chancado del mineral; obliga a diseñar y fabricar el blindaje o forro de caucho natural, formulado conforme a las normas ASTM, con la participación de la Industria peruana (YALE AUSACO, COMESA), para reemplazar el blindaje original afectando seriamente a la estructura principal del molino.



## **Delimitación del Problema**

- Nuevos Materiales como los cauchos naturales, debidamente formulados, tienen propiedades mecánicas y químicas para afrontar los problemas de desgaste, corrosión, impacto y sellado fundamentalmente.
- Molinos de bolas cilíndricos con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose) de mejor blindado, con menor peso, mayor duración, montaje y desmontaje fácil y menos riesgoso y amortiguación de ruidos, impactos y vibraciones.
- Las Normas ASTM de la sección 9 del caucho natural y sintético, proporcionan los métodos de ensayo para el control de calidad del tipo de caucho natural empleado en el blindaje del molino de bolas.

## **OBJETIVOS.**

- Fomentar el empleo de nuevos materiales más resistentes, de menor peso y fácil fabricación para el forrado de molinos de bolas cilíndricos con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose).
- Mostrar las ventajas y desventajas del sistema de forrado de caucho propuesto ante otros sistemas de forrado de acero al manganeso o al cromo que se han usado en el molino al comienzo de sus operaciones en la planta de molienda.
- Teniendo como base los requisitos de una molienda fina y remolienda óptima, de gran capacidad y con alta eficiencia mecánica de molienda, se diseña y fabrica el forrado de caucho considerando los mismos perfiles y volúmenes del sistema anterior de forrado de acero para mantener la misma capacidad de carga de molienda y eficiencia de molienda.
- Reducir, con la aplicación del forrado de caucho, problemas metalúrgicos, de corrosión y de sellado del forrado anterior de acero.
- Reducir el nivel de ruido ambiental.
- Reducir el peso del forrado.

- **aumentar la disponibilidad anual del molino**
- **Demostrar, a través de la relación Costo- beneficio, La viabilidad económica del empleo de nuevos materiales como el caucho natural, debidamente formulado, en el blindaje (revestimiento) (forrado) del molino.**

## CAPITULO II

### 2. EL CAUCHO

Es una sustancia natural o sintética que se caracteriza por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica. El caucho natural se obtiene de un líquido lechoso de color blanco llamado látex, y el sintético se prepara a partir de hidrocarburos insaturados.

El caucho es un polímero elástico cuyas moléculas gigantes forman verdaderas cadenas moleculares de hidrógeno y carbono, entrelazadas entre si y completamente al azar, cuyos eslabones (monómeros), que se van repitiendo, constituyen la unidad de las mismas. Hay cadenas (polímeros) cortas y largas alrededor de un promedio definido por el tipo de caucho.

Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos amorfos que permiten el movimiento molecular a temperatura ambiente y, además, permanecen suaves, cuyas dimensiones pueden variar mucho si son sometidos a tensiones mecánicas, de manera que tienden a recuperar sus dimensiones originales cuando las tensiones cesan. En la figura 2.1 se esquematizan los diferentes tipos de cauchos.



Figura 2.1 Tipos de Elastómeros, Ref.1.

**Tabla 2.1: Tipos de Caucho y su Origen**

SIGLAS	CAUCHOS	ORIGEN
NR	NATURAL	El caucho natural se obtiene en forma acuosa o látex practicando incisiones en el árbol Hevea Brasiliensis, natural de la selva del Amazonas, cultivado en Asia y África mediante plantaciones industrializadas
IR	POLIISOPRENO SINTETICO	Se logró un equivalente al caucho natural sintético a partir de 1954, por las firmas Goodrich y Firestone, seguidas por las Goodyear y Shell
SBR	BUTADIENO – ESTIRENO	Sintetizado industrialmente en 1937, en Alemania, pero fue en los Estados Unidos donde se desarrolló intensamente, desde 1942 y debido a la guerra.
BR	POLIBUTADIENO	Los polímeros de butadieno fueron de los primeros cauchos fabricados industrialmente, 1920 a 1930.

**Tabla 2.2: Cauchos diénicos (insaturados)**

Nombre	Fórmula	Propiedades destacadas	T <sub>g</sub> (°C)
<b>NR</b> natural	-CH <sub>2</sub> -CCH <sub>3</sub> =CH-CH <sub>2</sub> -	Elasticidad y resistencia	-70
<b>IR</b> Poliisopreno		Peores propiedades mecánicas que NR.	
<b>SBR</b>	-CH <sub>2</sub> -CH=CH-CH <sub>2</sub> -	Resistencia a alta T y O <sub>3</sub> .	-80/85
<b>SBS</b>		Elastómero termoplástico.	
<b>BR</b> polibutadieno		Resiliencia.	-105/-85
<b>NBR</b> nitrilo		Resistencia a disolventes apolares.	-20
<b>HNBR</b>		Resistencia a disolventes apolares y a envejecimiento y T.	
<b>CR</b> neopreno	-CH <sub>2</sub> -CCI=CH-CH <sub>2</sub> -	Buen conjunto de propiedades.	-50

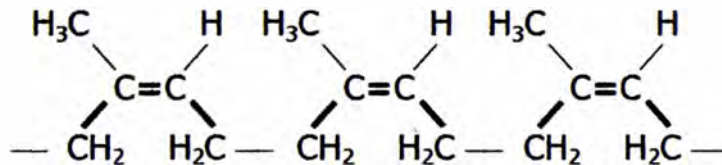
**Tabla 2.3: Cauchos monolefínicos (saturados)**

Nombre	Propiedades	T <sub>g</sub> °C
Cauchos butílicos (IIR)	Se obtienen por copolimerización de monolefinas lineales o cíclicas por no tener enlaces dobles son más resistentes a los agentes químicos, O <sub>2</sub> y O <sub>3</sub>	Tienen valores bajos
Cuchos de etileno-propileno (EPM, EPDM)		
Cauchos de polietileno sulfonado (CSM)		
Cauchos acrílicos (ACM)		
Cauchos fluorolefínicos (FKM)		
Elastómeros termoplásticos (SBS)		
Cauchos de silicona (MQ)		

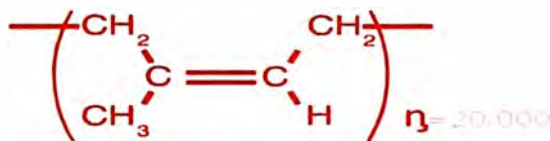
## 2.1. El caucho natural, su obtención y compuestos.

### 2.1.1. Caucho natural.

El caucho natural normal es un polímero lineal, conocido químicamente como CIS 1-4 POLIISOPRENO.



**Fig. 2.2: Estructura 1-4 cis poliisopreno del caucho natural: es cristalina y elastomérica**



**Fig. 2.3: Representación química de una molécula de caucho natural normal (el "trozo" de material más pequeño que existe en estado libre).**

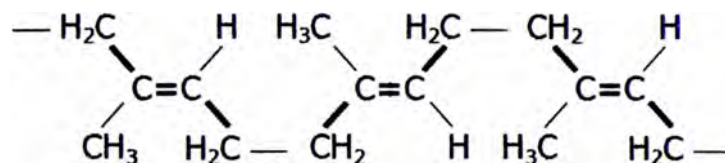
Es un hidrocarburo de naturaleza olefínica, con gran número de enlaces etílicos que forman una cadena de isoprenos cuya fórmula es C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>.

El caucho puede ser considerado un COLOIDE, es decir, formado por grandes agregados de moléculas. Hoy está generalmente aceptado que esa es una característica de las fibras, los plásticos y los cauchos, por eso la fórmula química

del caucho natural se representa como (C<sub>5</sub> H<sub>8</sub>) 20.000.

Estas moléculas gigantes son varios miles de veces mayores que las de las sustancias ordinarias pero están lejos de ser visibles aún con el más potente microscopio.

Es importante la estructura estereoespecífica cis (polímero natural 1-4 cis poli isopreno). Pero un caucho natural no sólo está conformado por la estructura cis también contiene la estructura 1-4 trans poliisopreno que es semicristalina y no elastomérica:



**Fig. 2.4: Estructura 1-4 trans poliisopreno del caucho natural: es semicristalina y no elastomérica**

#### Propiedades químicas

El caucho natural puro es insoluble en agua, álcali o ácidos débiles, y soluble en disolventes no polares (aceites minerales, benceno, tolueno, petróleo, nafta, y di sulfuro de carbono, hidrocarburos clorados CCl<sub>4</sub>,...) y atacable por oxidantes y ácidos (ácido nítrico HNO<sub>3</sub>, hipoclorito sódico NaClO, ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), pero con el oxígeno de la atmósfera lo hace lentamente. El MW (peso molecular) es de 700.000-2.300.000 g/mol.

La solubilidad del caucho crudo en sus disolventes más comunes no es muy elevada. Para hacer una solución de 10% es necesaria cierta disociación, ya por medios químicos, empleando un oxidante, ya por medio físicos, utilizando un molino.

Los disolventes más usados son el benceno y la nafta. Otros buenos disolventes son el tricloroetileno, tetracloroetano, pentacloroetano, tetracloruro de carbono, cloroformo, tolueno, xileno, keroseno y éter. El caucho se hincha primero poco a poco hasta las consistencias de gel y después éste se dispersa formando una solución. La viscosidad de la solución del caucho crudo es grande. Al calentarse hasta 200 °C se ablanda y sus soluciones tienen menor viscosidad, pero el número de dobles enlaces se conserva sin alteración.

Cuando la temperatura se eleva hasta 250 °C los enlaces dobles se separan y tiene lugar la formación de anillos. El cambio a caucho cíclico eleva la densidad y

la solubilidad, el producto obtenido es una dura y frágil resina.

### **Propiedades físicas**

A bajas temperaturas, se vuelve rígido, y cuando se congela en extensión (estirado) adquiere estructura fibrosa.

Calentando a más de 100 °C, se ablanda y sufre alteraciones permanentes.

El caucho crudo adquiere gran deformación permanente debido a su naturaleza plástica.

La plasticidad del caucho varía de un árbol a otro y también depende de la cantidad de trabajo dado al caucho desde el estado látex, de las bacterias que lo acompañan e influyen en su oxidación, y de otros factores. La plasticidad puede modificarse dentro de ciertos límites por la acción de productos químicos.

La densidad del caucho natural crudo a 0 °C es de 0.950 a 20 °C es de 0.934.

Cuando el caucho crudo ha sido estirado y deformado durante algún tiempo, no vuelve completamente a su estado original. Si se calienta, la recuperación es mayor que a temperatura ordinaria. Este fenómeno se denomina deformación residual o estiramiento permanente y es propio del caucho.

El caucho crudo absorbe agua. Los coagulantes usados en el látex al preparar el caucho afectan al grado de absorción de agua; usando ácido clorhídrico, sulfúrico o alumbre se obtienen cauchos con poder de absorción relativamente elevado. El poder de absorción de agua del caucho purificado es muy bajo.

Gran variedad de sustancias son solubles o pueden dispersarse en el caucho crudo, tales como el azufre, colorantes, ácido esteárico, N-fenil-2-naftilamina, pigmentos, aceites, resinas, ceras, negro de carbono y otras.

Si se estira un caucho en estado Crudo, se observa que algo en él resiste a ese estiramiento. Esta característica o propiedad se denomina, según jerga cauchera, nervio y la resistencia a la deformación se llama viscosidad.

El polímero de caucho natural sin tratar (crudo) es un material pegajoso, muy deformable y poco resistente.

### **Historia**

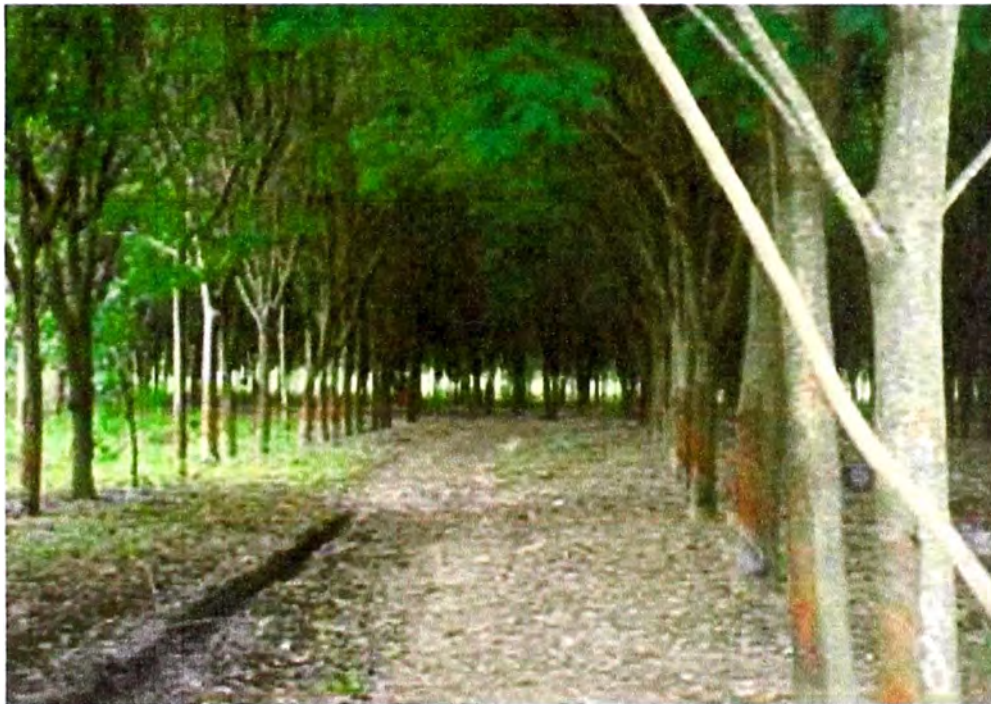
En el Siglo 19, eventos principales cambiaron el curso de la historia del caucho natural y pueden considerarse como los causantes del desarrollo de la industria del caucho:

- La invención del masticador por el inglés Thomas Hancock (1820) que permitió

ablandar, mezclar y deformar al caucho. Ese caucho ablandado podía disolverse en solventes.

- En 1823 Mackintosh uso tales disoluciones para fabricar impermeables. Pero el caucho no tenía importancia industrial, ya que éste se ablandaba con el calor y se endurecía con el frío.
- Con el descubrimiento de la vulcanización por Charles Good Year en 1839, para solucionar los problemas de uso industrial del caucho, se comenzó a fabricar gran cantidad de artículos.
- La invención del neumático por John Dunlop en 1888 y el comienzo de la era motorizada a comienzos del siglo 20 generaron una demanda explosiva del caucho.

Estos descubrimientos demandaron un tremendo esfuerzo en la extracción del látex y producción del caucho crudo en las junglas brasileras.



**Fig. 2.5: distribución de árboles Hevea en un suelo con clima cálido, con una distribución de temperaturas y lluvias uniforme.**



**Cuadro 2.1: Producción de caucho en el mundo, en toneladas métricas.**

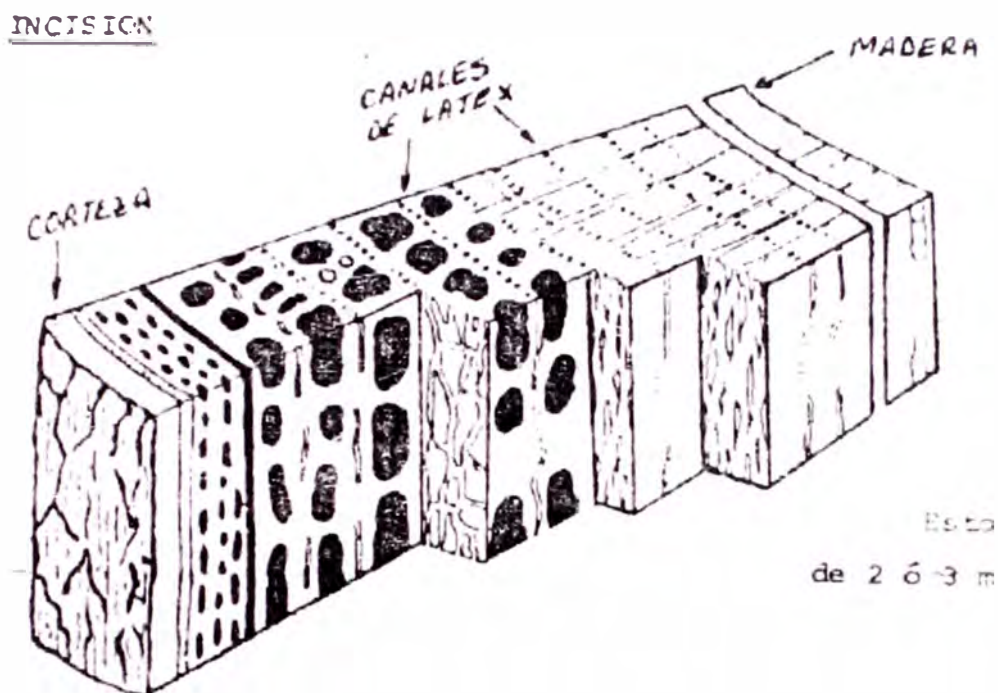


### 2.1.2. Obtención del caucho natural.

El caucho natural es extraído del látex (partículas esféricas de 0.3-1.0µm, recubiertas por película de proteína emulsionante) que es recogido en una taza. El producto que se obtiene del árbol, es una solución del caucho natural (30-40%), aminoácidos, minerales y otros elementos en los que sobresale el boro, el magnesio, carbono, bario y el agua (60-70%) esta solución se conoce como látex y fluye al abrir los haces de vasos laticíferos que posee la planta al interior de la corteza, mediante el proceso de sangría.

El látex se recoge durante 3 ó 4 horas y luego es enviado al centro de procesado. Alrededor del 80 - 85% del látex natural es recolectado en esta forma. El árbol, sin embargo, continua "sangrando" luego de la primera recolección. La última porción (15 a 20%) es dejada coagular espontáneamente en la taza para formar el Cuplump (o coágulo de taza) que es recogido el siguiente día. Asimismo, una pequeña porción coagula, alrededor de la incisión (o coágulo del árbol) y una mínima cantidad cae al suelo (Earth Scrap) o desperdicio en la tierra.

La figura 2.6 ilustra la delicada naturaleza interna del árbol, donde se efectúan incisiones en la corteza buscando los canales de látex. Estos están en una capa de 2 ó 3 mm de espesor. La incisión se efectúa generalmente en las primeras horas de la mañana, siempre y cuando no llueva, porque la lluvia corta drásticamente el flujo de látex.



**Fig. 2.6: Proceso de "sangrado" por el cual se obtiene el látex**

El látex fluye por varias horas y se finaliza obturando la entrada de los canales. Si el corte es re-abierto el próximo día, se obtiene más látex, lo que indica la rápida regeneración del producto en el interior del árbol.

El corte es efectuado con un cuchillo especial, de izquierda a derecha, con un ángulo de 20 - 30°.

El látex puro, es concentrado y vendido como látex líquido natural o coagulado para producir caucho natural y transformado en diversos grados de caucho natural seco. Estos grados pueden ser el de hoja ahumada (RSS), el de hoja secada por aire (ADS) los crepes pálidos, los crepes marrones o los modernos SMR, cauchos especificados técnicamente.

### **2.1.3. Compuestos del caucho natural.**

El compuesto de caucho más simple es el isopreno o 2-metilbutadieno, cuya fórmula química es  $C_5H_8$ . A la temperatura del aire líquido, alrededor de  $-19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el caucho puro es un sólido duro y transparente. De  $0$  a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  es frágil y opaco, y por encima de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  se vuelve blando, flexible y translúcido. Al amasarlo mecánicamente, o al calentarlo por encima de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso. A temperaturas de  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  o superiores se descompone.

El caucho natural, tal como abandona el árbol, es un material que posee una uniformidad razonable. Es en su proceso y manipuleo posteriores donde se produce mayor variabilidad en las propiedades del producto final, empleándose para ello materias primas o ingredientes que se unen íntimamente al caucho en la operación de mezclado: negro de humo, cargas claras, antioxidantes, ceras, antiozonantes, resinas, peptizantes, aceite, activantes, acelerantes, vulcanizantes. Las cargas claras presentan la característica de ejercer un efecto retardante sobre la vulcanización. Esto se debe en parte a su carácter ácido y además, a que absorben acelerantes en la superficie de sus partículas.

**Tabla 2.4: Control de materias primas mediante ensayos normalizados**

CONTROL DE MATERIAS PRIMAS		
TIPO DE MATERIAL	ENSAYO DE APROBACION	NORMA
CAUCHOS	VISCOSIDAD MOONEY POLIMERO	ASTM D1646
NEGROS DE HUMO	NUMERO DE IODO	ASTM D1510
	INDICE DE DBP	ASTM D2414
	PERDIDA POR CALOR	ASTM D1509
CARGAS CLARAS	FINEZA MALLA #200	ASTM D4572
	FINEZA MALLA #325	ASTM D4572
	PERDIDA POR CALOR	ASTM D4572
	AREA ESPECIFICA SILICAS	ASTM D1993
PLASTIFICANTES	VISCOSIDAD SAYBOLT UNIVERSAL	ASTM D88
	CONSTANTE VGC	ASTM D2501
	PUNTO DE ANILINA	ASTM D611
	INDICE DE REFRACCION	ASTM D1747
RESINAS TERMOPLASTICAS	PUNTO DE ABLANDAMIENTO	ASTM D3461
	INDICE DE ACIDEZ	ASTM D1980
ANTIDEGRADANTES	PUNTO DE FUSION	ASTM D1519
	PESO ESPECIFICO	ASTM D1817
ACELERANTES	PUNTO DE FUSION	ASTM D1519
	SOLUBILIDAD EN SOLVENTES	ASTM D1766
AZUFRE	AZUFRE INSOLUBLE	ASTM D4578
	FINEZA EN MALLA #200	ASTM D4572
AYUDAS DE PROCESO	CENIZAS	ASTM D4574
	MATERIA VOLATIL	ASTM D4571
	PUNTO DE ABLANDAMIENTO	ASTM D3461
OXIDO DE ZINC	FINEZA EN MALLA #325	ASTM D4572
	PERDIDA POR CALOR	ASTM D280
ACIDOS GRASOS	INDICE DE IODO	ASTM D1959
	INDICE DE ACIDEZ	ASTM D1980
	PUNTO DE FUSION	ASTM D1519
CERAS ANTIOZONO	CENIZAS	ASTM D1506
	PUNTO DE FUSION	ASTM D1519

### 2.1.3.1. Cauchos naturales secos de grados convencionales

La variabilidad de los grados convencionales (RSS, PALE CREPES, BROWN CREPES, BLANKET CREPES, etc.) se debe a la presencia o ausencia de impurezas, burbujas, uniformidad o intensidad del color, moho, etc.

Existen 35 grados de caucho natural diferentes, que a menudo es dificultoso separarlos entre sí, generando malos entendidos y disputas entre consumidores y productores. En la siguiente tabla se esquematizan estos grados:

**Tabla 2.5: Grados de cauchos naturales convencionales**

TIPO	FUENTE	GRADOS
HOJA AHUMADA (RSS)	Látex líquido coagulado con ácido diluido	1x, 1, 2, 3, 4, 5 y 6.
PALE CREPE	Látex líquido coagulado con ácido diluido	1x, 1, 2, y 3 grueso (Thick) y fino (Thin)
ESTATE BROWN CREPE	Coágulos espontáneos 1° Calidad	1x, 2x, 3x Lrrueso (Thick) y Fino (Thin)
COMPO CREPE	Coágulos espontáneos, scrap del árbol, hojas sin ahumar	1, 2, 3.
THIN BROWN CREPE	Idem. No se permite scrap del suelo.	1, 2, 3, 4
THICK BLANKET CREPE	Idem,	1, 2, 3.
FLAT DARK CREPE	Toda clase de coágulos incluyendo scrap del suelo,	Standard y Duro
PURE SMOKED BLANKET CREPE	Hojas ahumadas remolineadas o rechazos de hojas ahumadas	Standard

**Caucho RSS (tipo de hojas ahumadas).**

Se obtiene del látex puro, sin coágulos, el látex puro es diluido con agua hasta un 15% de contenido de caucho y luego coagulado con ácido fórmico o acético diluido.

Luego de reposar unas 15 horas, el coágulo es comprimido al pasar por pares de rodillos que remueven el agua y forman una hoja de alrededor de 5 mm de espesor. El par de rodillos final efectúa muescas (ribs) para facilitar el proceso de secado posterior.

Las hojas del coágulo se secan con humo (hojas ahumadas) en recintos donde se quema madera del propio Hevea, con temperaturas entre 38 y 60°C. El humo contiene fungicidas naturales que protegen el caucho.

Luego del secado, el RSS es embalado en fardos de aproximadamente 113 Kg., los cuales son impregnados con talco para prevenir la adhesión de los mismos.

**Caucho ADS (air dried sheets).**

Se obtiene secando el mismo material en hojas del RSS pero en un túnel con corriente de aire caliente, de ahí su nombre. Tiene un color ambarino pálido.

**Caucho crepe pálido (tipo Palé Crepé).**

Para fabricarlo, se seleccionan látices especiales, de bajo contenido de pigmentos amarillos, alta viscosidad y baja tendencia a la decoloración por procesos enzimáticos. Estos látices se diluyen hasta un contenido de caucho del 20%. Los pigmentos amarillos se alimentan por coagulación fraccionada o con ayuda de agentes blanqueadores como el XYLYL MERCAPTAMO (En la práctica se utiliza una combinación de ambos métodos).

El látex así tratado se coagula con ácido fórmico o acético diluidos y se pasa por una serie de molinos con una cierta fricción. El resultado es una lámina crepé, de 1 a 2 mm de espesor, que se seca con aire caliente. El crepé pálido es embalado en fardos de 102 Kg., Impregnando con talco y envuelto en bolsas de papel.

#### **Caucho Brown crepe.**

Se fabrican a partir de una mezcla de látex espontáneamente coagulados, en la tasa de recolección (cup lump) o en la incisión (tree lace), los que son sometidos a una intensa limpieza y molineado en una batería de cilindros que giran con una cierta fricción. Se toman cuidados especiales en la selección de los coágulos para obtener uniformidad de color del producto final. El caucho resultante es secado con aire y embalado en forma similar a los crepés pálidos.

#### **Caucho blanket crepe.**

El blanket crepé usa como materia prima, además del cup lump y tree lace, hojas sin ahumar.

#### **Compo crepe**

El compo crepe, un grado inferior, utiliza además coágulos que cayeron al suelo (Earth Scrap).

#### **2.1.3.2. Cauchos naturales secos especificados técnicamente (SMR).**

En 1965 los productores de caucho natural introdujeron el caucho SMR, que tiene una especificación técnica para poder evaluar su calidad, en lugar de la clasificación visual de los grados convencionales.

Malasia comenzó con el SMR (STANDARD MALAYSIAN RUBBER), siguiendo Indonesia con el SIR, Tailandia con el STR y Singapur con el SSR. Comparando al proceso de obtención del RSS, el esquema del SMR introduce una serie de ventajas:

- Existencia de una especificación técnica con la que se puede evaluar la calidad del caucho mediante ensayos de laboratorio.

- El caucho SMR está fabricado por el proceso hevea crumb, donde se agrega un 0.7% de aceite de castor al látex para que coagule posteriormente en forma de migas (CRUMBS). De esta manera se obtiene un excelente rendimiento en el lavado, reduciendo y uniformizando los niveles de impurezas que pudieran afectar su calidad.
- Hay una diferencia fundamental en la presentación del caucho, en forma de pequeñas balas de alrededor de 33 Kg. de peso cada una, facilitando así el almacenado o estibaje y el manipuleo durante los procesos. Cada bala viene envuelta en un film de polietileno de 109°C de punto de fusión y 0.03 mm. de espesor, En él se encuentra el símbolo que se observa en la Fig. 2.6. Las balas se palletizan en "paquetes" de 1 tonelada.



**Fig. 2.7: Símbolo de la envoltura del caucho SMR en forma de bala.**

Con todos estos adelantos lo que se busca es una mayor uniformidad en la calidad del caucho, eliminando las subjetividades en la evaluación de la misma.

Hay tres tipos de cauchos SMR:

- Los que provienen del látex puro: SMRCV, SMRLV, SMRL, SMRS y SMRWF,
- Los que se fabrican a partir de coágulos espontáneos: SMR10, SMR20 y SMR50.
- El que se fabrica a partir de mezclas de látex puro/coágulos espontáneos: El SMRPG

En la siguiente tabla se esquematizan las especificaciones técnicas los cauchos SMR:

**Tabla 2.6: especificaciones técnicas los cauchos SMR**

CAUCHO	SMR. CV	SMR LV	SMR L	SMR WF	SMR 5	SMR 6P	SMR 10	SMR 20	SMR 50
ORIGEN	LATEX PURO				Material de Hojas	Mezcla	COAGULOS ESPONTANEOS		
IMPUREZAS (MAX. %)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.10	0.10	0.20	0.50
CONTENIDO DE CENIZAS (MAX. %)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.75	0.75	1.00	1.50
MATERIAL VOLÁTIL. (MAX. %)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
CONTENIDO DE NITRÓGENO	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
INDICE DE RETENCION DE PLASTICIDAD (MINIMO %)	60	60	60	60	60	50	50	40	30
COLOR Identificación BALAS	Negro	Negro	Verde Claro	Verde Claro	Verde Claro	Azul	Marrón	Rojo	Amarillo

**Cauchos SMR de viscosidad estabilizada.**

Son los cauchos CV y LV que tienen un rango de viscosidad Mooney garantizado:

**Tabla 2.7: Rango de viscosidad Mooney de cauchos CV y LV**

GRADO	ML1 + 4 a 100°C
CV 50	45 – 55
CV 60	55 – 65
CV 70	65 – 75
LV 50	45 – 55

Uno de los factores más importantes del caucho natural es su viscosidad, que es una medida de su peso molecular, es decir de la longitud de las cadenas del polímero y de su capacidad de fluir o de deformarse en crudo.

En todo el proceso de obtención y procesamiento del caucho natural hay innumerables factores que influyen en los valores de viscosidad; además esa viscosidad aumenta con el estacionamiento del caucho en forma impredecible. Por estas razones se fabrican cauchos de viscosidad estabilizada en un cierto rango, para garantizar posteriormente una cierta uniformidad de proceso de los compuestos y sus propiedades. Estos cauchos se llaman "CV", y se fabrican



seleccionando cuidadosamente el látex, tratándolo con HIDROXILAMINA, con concentración controlada.

Cuando se requieren Cauchos de viscosidad más bajos, se agregan 4 partes de un plastificante (aceite nafténico), resultando así los cauchos "LV".

La retención de viscosidad de estos cauchos ha sido controlada por varios días. Esta ventaja tiene gran importancia para el mezclado en Bambury, ya que con estos cauchos es posible eliminar la etapa de pre masticación previa con el consiguiente ahorro de mano de obra, tiempo de máquina y energía.

#### **Caucho SMR-GP.**

Se fabrica a partir de una mezcla del 60% de látex puro y 40% de coágulos espontáneos. Es decir, se trata de un caucho de viscosidad estabilizada (como el SMR CV) y sin aceite agregado (como sería el SMR-LV).

El hecho de utilizar como materia prima coágulos espontáneos (como el SMR-10, 20 ó 50), asegura un gran volumen de producción, con mejor calidad que los tres SMR nombrados.

El SMR-GP tiene un rango de viscosidades especificado en 58 - 72 unidades Mooney. Este rango y la uniformidad de viscosidades que se obtienen con su uso, hacen - en general - innecesaria la premasticación de este caucho antes del agregado de cargas y demás ingredientes. En la siguiente tabla se ofrece un ejemplo comparativo de la variación de viscosidad:

**Tabla 2.8 variación de viscosidad de cauchos SMR y RSS en Bambury.**

CAUCHO	VARIACIÓN DE VISCOSIDAD EN BANBURY			
	UNIDADES MOONEY			
	PURO	MASTICADO	BASE	FINAL
SMR-GP	10	-	9	6
SMR-20	24	25	28	12
RSS N°3	22	22	28	13

Para una producción realizada totalmente en Bambury, el hecho de no masticar previamente al SMR-GP implica una importante reducción de tiempo y energía consumida, del orden del 35% en algunos compuestos.

#### **2.1.3.3. Cauchos naturales especiales**

##### **Caucho de procesado superior (SP).**

Estos cauchos se obtienen coagulando una mezcla de 80% de látex normal

y 20% de un látex ligeramente vulcanizado. Este último se prepara agregando al látex normal un sistema de curativos especial, calentando por varias horas con vapor vivo a 85°C y enfriando durante la noche. Los cauchos SP (procesado superior) se embalan en la forma corriente.

Estos cauchos tienen "más cuerpo" y por lo tanto dan mayor estabilidad dimensional en el extrusionado de piezas "difíciles", mejoran el aspecto de la superficie (lisura), reducen la porosidad, el hinchamiento en calandra y las marcas de vapor en la vulcanización de autoclave.

Las marcas más conocidas son PA80, PA57, SP RSS y SP ADS. El PA80 es una forma más concentrada porque la relación de látex puro/látex vulcanizado es de 20%/80%.

#### **Caucho (AC) (anticristalizante).**

Es una mezcla en equilibrio de las formas CIS y TRANS del caucho natural. La forma CIS corresponde al caucho natural "normal" y la TRANS a un caucho con características de material plástico.

El caucho AC se utiliza para evitar la cristalización del compuesto, a bajas temperaturas.

#### **Caucho Injertado (heveaplus: MG30, Mg49).**

Desde el año 1941, el Instituto Francés del Caucho estuvo trabajando en la inserción, dentro de la molécula de caucho natural, de monómeros como el estireno, acrilonitrilo, etc.

Dentro de los cauchos injertados, uno de los más usados es el heveaplus, que se obtiene injertando metacrilato de metilo como monómero en el látex natural. El heveaplus se comercializa en forma de caucho o de látex con un contenido de metacrilato de metilo entre 30 y 50%. Es autoreforzante y puede formularse en conjunto con caucho natural o sintético para conferir dureza y resistencia al impacto de compuestos claros.

#### **Caucho Pelletizado.**

Malasia ha producido caucho en forma de pellets, de tamaño algo mayor que 1mm, mantenidos "libres" (es decir, no aglomerados) por medio de un agente especial.

El uso presente es el de adhesivos en solución aunque en compuestos puede facilitar el mezclado. También caucho en polvo (partículas menores a 1 mm).

#### **Caucho extendido en aceite (EONR).**

Comúnmente contienen entre 20 y 30% de un aceite aromático o naftánico. El EONR es superior a los cauchos sintéticos en cuanto a la propiedad de la resistencia al resbalamiento en superficies húmedas o heladas. Prácticamente su uso queda restringido a la industria del neumático, en la fabricación de cubiertas para invierno (WINTER TIRES).

#### 2.1.3.4. Significado de los valores especificados técnicamente.

- Nivel de Impurezas

Está relacionado con ciertas propiedades mecánicas del caucho, como la carga de rotura y fundamentalmente, la resistencia a la fatiga:

**Tabla 2.9 Influencia del nivel de impurezas del caucho en propiedades mecánicas**

	Impurezas	Carga de rotura	Fatiga kc hasta la falla
SMR -5	0.05%	300 Kg./cm <sup>2</sup>	151
RSS 3	0.09%	290 Kg./cm <sup>2</sup>	115
BROWN CREPE	0.23%	280 Kg./cm <sup>2</sup>	105

- Índice de retención de plasticidad (PRI).

El ensayo de PRI, se desarrolló Inmediatamente del lanzamiento de los cauchos SMR, permite predecir el comportamiento de proceso y la resistencia al envejecimiento del caucho natural. Se efectúa sobre muestras de caucho crudo, extraídas directamente de las balas. Consiste en medir la plasticidad wallace antes y después del envejecimiento de la muestra en estufa, durante 30 minutos a 140°C, bajo condiciones cuidadosamente controladas.

El resultado del ensayo expresa el porcentaje de su plasticidad original que el caucho retiene:

$$PRI = \frac{P_{We}}{P_{Wo}} \times 100 \quad (2.1)$$

PWe = Plasticidad Wallace luego del envejecimiento

PWo = Plasticidad Wallace original, es decir, de la muestra sin envejecer.

El ensayo se realiza en el PLASTIMETRO WALLACE, equipo especial para efectuar el ensayo a los cauchos SMR; es muy rápido, sólo toma 25 seg. Por

muestra.

El índice PRI es una medida de la resistencia del caucho a la oxidación por calentamiento, dato que sirve para pronosticar el comportamiento del caucho en la masticación y mezclado, así como también con respecto a su resistencia al envejecimiento una vez vulcanizado y si este índice no cae tanto es porque el caucho resiste a la degradación (en el caso ideal, un PRI = 100 significa que el caucho no se envejece o degrada por calentamiento).

Además, el PRI es un "termómetro" que permite detectar materiales indeseables en el caucho, que pueden degradarse biológicamente. La siguiente tabla muestra la diferencia entre dos cauchos convencionales, de distinta calidad:

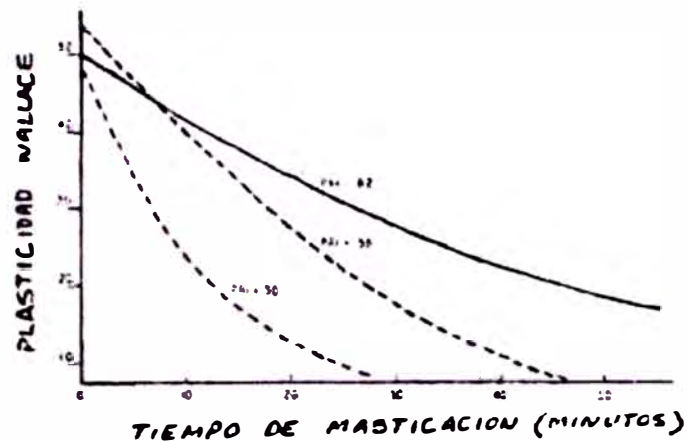
**Tabla 2.10 Diferencia entre dos cauchos convencionales de Distinta calidad % de 500 muestras**

PEI	RSS	Estates' Brown crepe	Remillers' Brown crepe
100 110	6. 5		
90 99	42. 9	0. 4	
80 89	50. 5	11. 4	
70 79	0. 4	40. 2	
60 69		30. 4	2. 8
50 59		13. 3	28. 2
40 49		2. 8	39. 6
30 39		1. 3	28. 2
20 29		0. 2	1. 2

El PRI es una indicación de la velocidad de masticación (rompimiento mecánico de las moléculas en trozos moleculares más chicos) de un caucho a relativamente alta temperatura. Este rompimiento mecánico se debe a la fricción existente en la mezcladora o Bambury.

Pero según el ensayo de PRI, también la masticación está gobernada por un proceso de oxidación o degradación del caucho debido a la acción de la temperatura. La masticación del caucho produce una disminución de viscosidad por un proceso mecánico- oxidativo, ver fig. 2.8.

El aspecto oxidativo ocurre siempre cuando haya aire presente; el oxígeno actúa como un aceptor de trozos moleculares rotos por acción mecánica.



**Fig.2.8 influencia del PRI sobre la velocidad de masticación de cauchos de viscosidad original equivalente**

La relación entre el PRI y la resistencia al envejecimiento de los distintos cauchos, ya formulados y vulcanizados, se puede analizar en la siguiente tabla:

**Tabla 2.11: Relación entre el PRI y la resistencia al envejecimiento de los distintos cauchos, ya formulados y vulcanizados.**

CAUCHO	PRI (%)	PERDIDA DE CARGA DE ROTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )
SMR-5	72	115
RSS 1	73	103
RSS 3	77	112
SMR-2 0	64	134
BROWN CREPE	58	138

## 2.2. Cauchos sintéticos y compuestos.

### 2.2.1. Buna S o caucho artificial (SR).

Fue desarrollado en los años 1930, preparado por I.G. Farbenindustrie en Alemania. Químicos alemanes sintetizaron en 1935 el primero de una serie de cauchos sintéticos llamados Buna, obtenidos por copolimerización, que consiste en la polimerización de dos monómeros denominados comonómeros.

La palabra Buna se deriva de las letras iniciales de butadieno, uno de los comonómeros, y natrium (sodio), empleado como catalizador.

El proceso de fabricación del buna S es a través de un procedimiento de emulsión que usa la polimerización como medio de creación del material, el cual posee poca reacción viscosa, pero conserva todos los atributos del caucho natural.

### 2.2.2. Caucho Buna-N

En el Buna-N, el otro comonomero es el acrilonitrilo ( $\text{CH}_2=\text{CH}(\text{CN})$ ), que se produce a partir del ácido cianhídrico. El Buna-N es muy útil en aquellos casos que se requiere resistencia a la acción de aceites y a la abrasión.

### 2.2.3. Poliisopreno sintético (IR).

El POLIISOPRENO SINTETICO, se aproxima a la estructura química del caucho natural. Es un CIS 1, 4 POLIISOPRENO, con la diferencia de ser fabricado por el hombre en lugar de ser obtenido a partir del producto natural de un árbol.

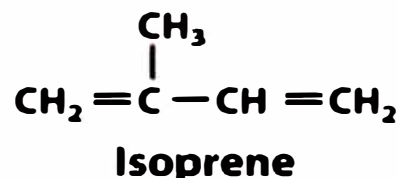
El IR y el NR tienen buena pegajosidad en crudo, alta carga de rotura en compuestos poco cargados, alta resiliencia, baja histéresis y buena resistencia al desgarre en caliente. Aunque el POLIISOPRENO SINTETICO es químicamente similar al caucho natural, hay pequeñas diferencias comparadas con éste último que resultan en ventajas o desventajas, según el caso.

El POLIISOPRENO es más fácil de procesar, es más claro en su color, más uniforme y de mayor pureza. Por otro lado, tiene menor resistencia mecánica en crudo (menos "cuerpo") lo que hace dificultoso el reprocesado de material rechazado.

En general, el producto sintético proporciona menores módulos y mayores elongaciones que el producto natural, con algunas diferencias (pequeñas) en la velocidad de vulcanización.

### Grados comerciales de poliisopreno sintético

El caucho sintético se prepara a partir de hidrocarburos insaturados. Hace mucho tiempo los químicos buscaban sintetizar la molécula del caucho natural a partir del ISOPRENO.



**Fig. 2.9: fórmula del Isopreno**

De las investigaciones realizadas resultaron elastómeros con diferentes propiedades comparadas a las del NR, debido a que los monómeros (eslabones de

la cadena del polímero) estaban enganchados entre sí de diferentes maneras,

Con el descubrimiento y desarrollo de catalizadores especiales se pudo polimerizar el isopreno que es una forma más controlada, imitando de esta manera lo que la naturaleza realiza en el árbol.

Es menos rígido, duro y resistente que NR, pero menor histéresis y deformación permanente por compresión.

La comercialización del poliisopreno sintético fue iniciada en 1960 por la Shell. En 1962 se introduce el NATSYN, poliisopreno desarrollado por la División Química de la Good Year. La compañía Goodrich introdujo su AMERIPOL SN alrededor de 3 años más tarde, todos estos cauchos son de la forma CIS.

**Tabla 2.12: Grados comerciales de poliisopreno sintético**

DESIGNACIÓN	COMPANÍA	DESCRIPCION
NATSYN 20 0	GOOD-YEAR	PROPOSITOS GENERALES
NATSYN 2200	GOOD-YEAR	PROPOSITOS GENERALES
NATSYN 2201	GOOD-YEAR	GRADO FARMACEUTICO
NATSYN 22 05	GOOD-YEAR-	HILOS DE GOMA
NATSYN 2210	GOOD-YEAR	BAJO MOONEY
AMERI POL SN 606	GOODRICH	PROPÓSITOS GENERALES
TRANS PIP	POLIMER CORP.	POLIMERO ESPECIAL

**Tabla 2.13: Características del caucho NATSYN 2200**

<b>COLOR</b>	BLANCO
<b>DENSIDAD</b>	0.91 Kg./lt
<b>RANGO VISCOSIDAD</b>	75-95
<b>MATERIA VOLATIL</b>	1%
<b>CENIZAS</b>	0.5%
<b>CONTENIDO CIS</b>	97%
<b>PESO MOLECULAR PROMEDIO</b>	350-400.000 g/mol

#### 2.2.4. Otros Tipos de caucho sintético industriales

Se producen varios tipos de caucho sintético: neopreno, buna, caucho de butilo y otros cauchos especiales:

### a.- Neopreno, Policloropreno o clorocaucho (CR)

Uno de los primeros cauchos sintéticos logrados gracias a la investigación de Carothers fue el neopreno, el polímero del monómero cloropreno, de fórmula química  $-\text{CH}_2-\text{C}(\text{Cl})-\text{CH}=\text{CH}_2-$ . Las materias primas del cloropreno son el etino y el ácido clorhídrico. El neopreno fue desarrollado en 1931 y es resistente al calor y a productos químicos como aceites y petróleo.

Es un Polímero de 2-cloro-1,3-butadieno, tiene 3 posibilidades de polimerización:

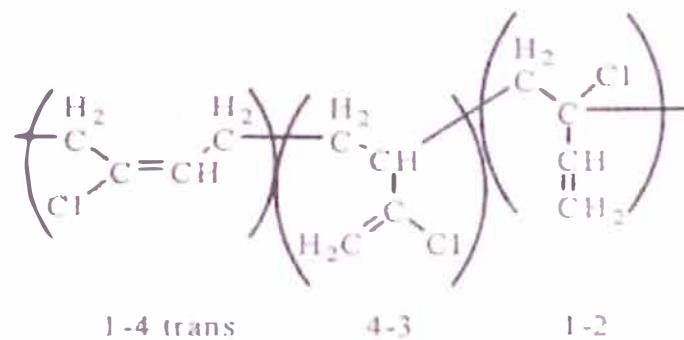


Fig 2.10: polimerización del caucho CR



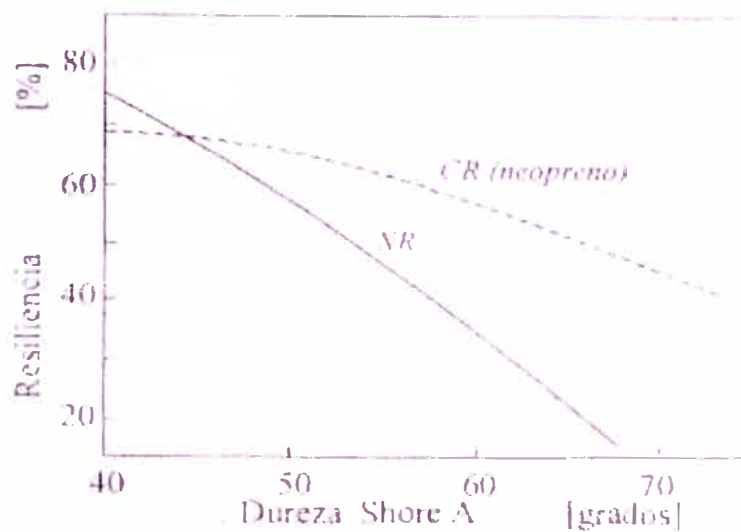
© Can Stock Photo - cap1669166

Fig.2.11 Neopreno, (polychloroprene), sintético, caucho, químico, estructura, Átomos, representado, esferas, convencional, Color, coding:, Hidrógeno, (white), carbón, (grey), cloro, (Green)

Propiedades:

- Buena resistencia al envejecimiento y al O<sub>3</sub>: el Cl protege el doble enlace. También a temperatura relativamente alta.
- Buenas propiedades mecánicas.





**Fig.2.12: Propiedades mecánicas del CR (neopreno).**

- Presentan cristalización inducida por deformación.
- Son Auto extingüibles.
- Tienen Elevada densidad relativa cerca de 1,2.

#### **b.- Caucho Estireno-Butadieno (SBR).**

Se obtuvo industrialmente en 1937 por copolimerización de butadieno y estireno (típicamente 25% en peso), frecuentemente abreviado SBR (del inglés Styrene-Butadiene Rubber).

Las Características estructurales que determinan las propiedades son:

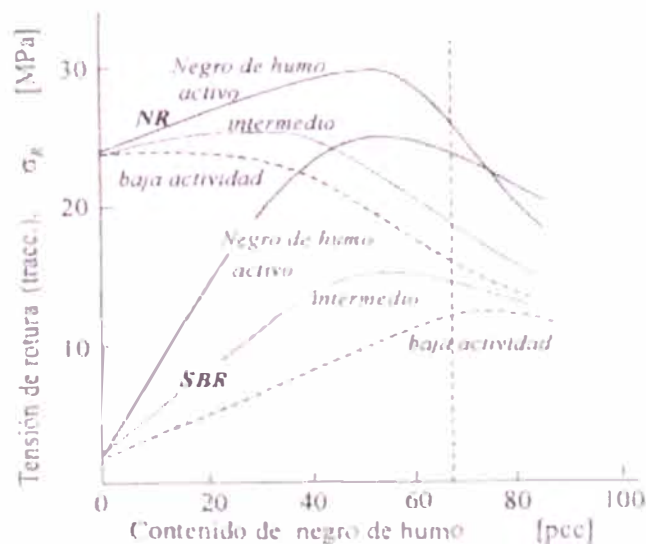
- Proporción de monómeros 1-4-cis, trans, vinilo.
- Tipo de copolímero: al azar / en bloques.

Los Efectos reforzantes, en grados de dureza, en las gomas SBR con distintos tipos de negro de carbono (Negro de humo), adicionando 10 pcc (partes por ciento de caucho) de negro de humo según superficie específica, se aprecia en la siguiente tabla:

**Tabla 2.14: Efecto reforzante en grados de dureza en las gomas SBR con distintos tipos de negro de carbono.**

Tipo	Tamaño de partitura [nm]	Superficie específica [m <sup>2</sup> /g]	Efecto reforzante (grados de dureza)
N 990	470	<10	1
N 770	60 – 80	17 - 33	3
N 660	50	26 - 42	4
N 550	40	36 - 52	5
N 330	29	70 - 90	6
N 220	23	110 - 140	7
N 110	20	125 -155	8
Ultrafino	10	>200	10

El negro de humo incrementa la resistencia mecánica a la tracción de SBR en mucha mayor medida que en NR, esto se aprecia en la siguiente figura:



**Fig.2.13: El negro de humo incrementa la resistencia mecánica de SBR**  
**Con 10 pcc (partes por ciento de caucho) de CaCO<sub>3</sub>, CaSiO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o caolín,**  
**la dureza se incrementa en 3 grados como mucho.**

**Con 10 pcc de SiO<sub>2</sub> muy fina, la dureza se incrementa den 5-7 grados.**

**Con 10 pcc de plastificantes, la dureza se reduce hasta 5 grados.**

En general presenta las siguientes propiedades Propiedades:

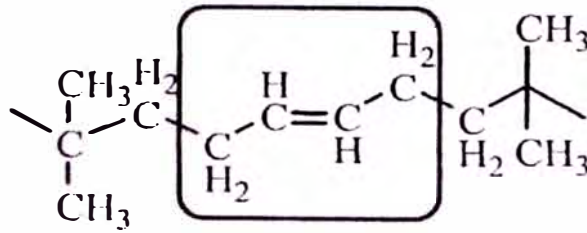
- Rangos de dureza disponible:
  - a. Productos rígidos: 40 ShA - 90 ShA
  - b. Productos microporosos: 10 ShA – 35 ShA
- Mecánicas:
  - a. Moderada resiliencia.
  - b. Excelente resistencia a la abrasión.
  - c. Moderada resistencia al desgarro.
  - d. Excelente resistencia al impacto.
  - e. Moderada resistencia a la flexión.
- Físicas
  - a. Temperatura de servicio: –10 °C a 70 °C.
  - b. Baja resistencia a la intemperie (oxidación, ozono, luz solar).
  - c. Excelente resistencia eléctrica.
  - d. Muy baja permeabilidad a los gases.
- Químicas
  - a. Buena resistencia al agua pero pobre resistencia al vapor de agua.
  - b. No poseen resistencia a los hidrocarburos (alifáticos, aromáticos, clorados).
  - c. Baja resistencia a ácidos diluidos, menor aún en caso de mayor concentración.
  - d. Baja resistencia a los aceites (animal y vegetal).

**c.- Caucho de butilo (butílico) (IIR).**

Producido por primera vez en 1949, se obtiene por copolimerización de isobutileno con butadieno o isopreno.

Es un plástico y puede trabajarse como el caucho natural, pero es difícil de vulcanizar. Aunque no es tan flexible como el caucho natural y otros sintéticos, es muy resistente a la oxidación y a la acción de productos corrosivos. Debido a su baja permeabilidad a los gases, se utiliza en los tubos interiores de las llantas de automóviles.

La Composición: isobutileno + pequeñas cantidades de isopreno, es Poliisobutileno que no puede reticularse con peróxidos. Posee un porcentaje de instauración molar de monómeros con doble enlace generalmente del orden de 0.6 al 2.5%.



**Fig. 2.14: Poliisobutileno caucho butílico (IIR)**

Es Incompatibles con NR, se emplea sólo o mezclado con EPM/EPDM.

El IIR halogenado (bromuración o cloración): es compatible con NR y puede reticularse con óxidos metálicos (Como ZnO<sub>2</sub>).

El IIR Se puede Vulcanizar con:

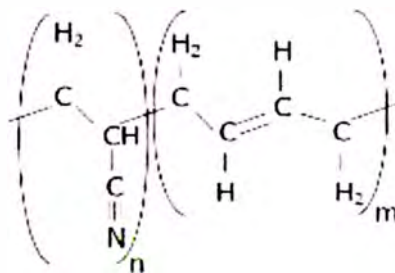
- S + ultraacelerantes y activadores.o
- Oximas (R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>CNOH) y resinas de formaldehido.

Presenta las siguientes Propiedades:

- Buena resistencia a agentes químicos, O<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> y al envejecimiento.
- Baja permeabilidad a gases.
- Muy baja resiliencia.

#### **d.- Caucho de acrilonitrilo butadieno (NBR)(NITRILO)**

Son Copolímeros de butadieno y acrilonitrilo (~ 18-50% peso):



**Fig.2.15: Copolímeros de butadieno y acrilonitrilo, NBR (NITRILO)**

Una composición con Mayor cantidad de acrilonitrilo Influye, por su grupo polar, en las siguientes propiedades químicas:

- Resistencia a disolventes no polares como gasolina, aceites, hidrocarburos.
- Compatibilidad con materiales polares, tales como PVC.

Una composición con Mayor cantidad de acrilonitrilo Influye en las siguientes propiedades mecánicas:

- Mayor resistencia a tracción, abrasión
- Mayor dureza
- Mayor estabilidad a alta temperatura (hasta 110°C).
- Peores propiedades elásticas: menor resiliencia y mayor deformación permanente.

Estos cauchos Tienen Propiedades destacables como: resistencia a los disolventes orgánicos, ver tabla 2.15:

**Tabla 2.15: Hinchamiento y pérdida de resistencia a la tracción de distintos tipos de gomas sumergidas en aceite mineral durante 28 días a 70 °C.**

		NR	HR	SBR	CR	NBR
<b>Hinchamiento</b>	%p	250	160	95	45	14
<b>Resistencia a tracción</b>						
- Inicial	Mpa	27	11	22	24	22
- Final	MPa	2	3	7	24	22

#### **e.- Fluoroelastómeros (FKM - Viton, Fluorel)**

Los Cauchos fluorolefínicos (fluoroelastomers, FKM) se componen de copolímeros de:

- Fluoruro de vinilideno VDF [ -(CH<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>)<sub>n</sub>- ].
- Hexafluorpropileno.
- Tetrafluoroetileno TFE.
- Éter perfluorometilvinílico.

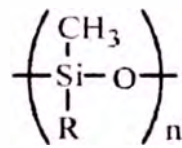
La Reticulación se produce, en presencia de óxidos metálicos y diamina, la desfluoración mas adición de diaminas. Presenta las siguientes Propiedades:

- Resistencia química.
- Resistencia al calor (hasta cerca de 250°C)

- Resistencia a hidrocarburos.
- Resistencia al vapor de agua
- Resistencia a ácidos.
- Resistencia al O<sub>3</sub>, a la intemperie.
- Autoextinguibles.
- Muy elevado precio.


#### f.- Caucho de silicona

Está compuesto por cadenas con monómeros de tipo siloxano



**Fig.2.16: Cadenas con monómero de tipo xiloxano(caucho de silicona)**

El Grupo lateral R, puede ser por ejemplo según figura:

$\text{---CH}_3$	metilo	Polidimetilsiloxano
	fenilo	Polimetilfenilsiloxano
$\text{---}\overset{\text{H}_2}{\text{C}}\text{---}\overset{\text{H}_2}{\text{C}}\text{---CF}_3$	γ-trifluor-propilo	Polimetiltrifluorpropilsiloxano

**Fig.2.17: grupo lateral R del monómero del caucho de silicona.**

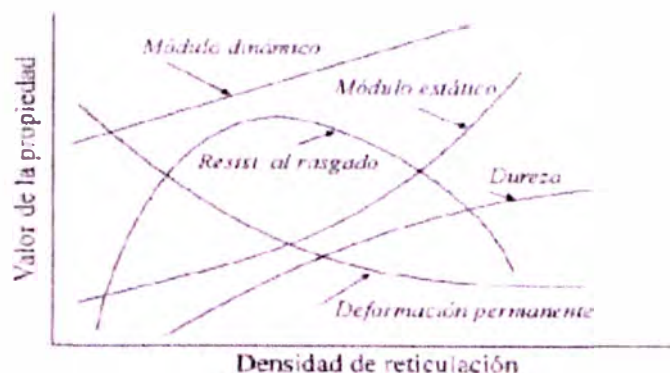
La gran mayoría de elastómeros de silicona son del tipo: polidimetilsiloxano.

El peso molecular de prepolímeros de elastómeros es de hasta ~ 1.000.000 g/mol.

**Tabla 2.16: Clasificación ASTM D 1418 de siliconas**

Designación	Prepolimeros	Curado	Características
MQ	Polidimetilsiloxano	P	
VMQ	Polidimetilvinilmetilsiloxano	P/E	
PVMQ	Polidimetilvinilmetil/difenilsiloxano	P/E	Menor T <sub>g</sub>
FVMQ	Poli-γ-trifluorpropilmetilvinilmetilsiloxano	P/E	Resistencia química

Notas: P, Peróxidos; P/E, Peróxidos y/o endurecedores



**Tabla 2.17: Propiedades típicas de las siliconas elastoméricas estándar**

PROPIEDADES TÍPICAS DE LAS SILICONAS ELASTOMÉRICAS ESTÁNDAR

Aspecto		transparente
Densidad		1,09 - 1,17
Resist. en tracción	MPa	7,0 - 10,0
Alargamiento a la rotura	%	700 - 300
Resistencia al desgarro	N/mm	20 - 40
Resiliencia	%	45 - 70
Deform. permanente	%	15 - 35
Dureza Shore A		20 - 70
Resistividad volum.	$\Omega\text{cm}$	$5 \cdot 10^7$
Const. dieléctrica 50Hz		3,1
COI	%	27

**Fig. 2.18: variación de las Propiedades mecánicas de siliconas elastoméricas estándar en función de la densidad de reticulación**

### 2.3. Vulcanización del caucho.

Antes del año 1840 el caucho natural estaba confinado casi exclusivamente a la impregnación de telas de algodón y seda. La vulcanización se descubrió en 1839, es decir, la combinación del caucho GOODYEAR el descubridor en USA; sin embargo el descubrimiento fue anunciado simultáneamente por GOODYEAR y por THOMAS HANCOCK en Inglaterra.

La vulcanización es un proceso en el que el caucho se cura agregando sulfuro, que resulta en un material duro y durable con grandes propiedades mecánicas. Se necesitan temperaturas de entre 82 y 177 grados Celsius para la

vulcanización, y actualmente se utilizan otros aditivos además del sulfuro. Este proceso genera enlaces químicos entre las cadenas de polímeros y reduce ampliamente la plasticidad.

### **2.3.1. Proceso de vulcanización del caucho natural**

Es el proceso por el cual el caucho, esencialmente plástico, se transforma en vulcanizado, esencialmente elástico. Este proceso llamado también intracruzamiento, no solo consiste en la reacción química entre el elastómero y el azufre, también considera el método mediante el cual dicho entrecruzamiento se produce.

Dos hechos suceden en la vulcanización:

- a. El azufre se combina con el caucho.
- b. El grado de insaturación del hidrocarburo caucho disminuye en el curso de la vulcanización.

Según la teoría de FARMER Y BLOOMFIELD el mecanismo teórico de la vulcanización con azufre, muestra diversas posibilidades de enlaces intermoleculares:

#### **a. Formación de radicales libres**

Inicialmente, un átomo de hidrogeno del grupo alfa metileno se desunirá dando, en presencia de azufre, un radical hidrogeno y un radical sulfhídrico.

#### **b. Reacciones del radical hidrocarbonado**

El radical hidrocarbonado formara, en presencia de azufre, un radical sulfuro a partir del cual se pueden considerar tres series de reacciones:

- Dimerización de radicales entre ellos mismos, condicionando a puentes de di sulfuro, mono sulfuro o carbono-carbono; sin pérdida de insaturación.
- Reacciona en cadena por la adición de un radical sulfuro sobre el doble enlace, con pérdida de insaturación correspondiente a un doble enlace por átomo de azufre.
- Reacciona en cadena por el traslado de un átomo de hidrogeno a otras moléculas para formar un mercaptano, que se oxida en presencia de azufre, originando enlaces di sulfuro o poli sulfuro.

#### **c. Reacciones del radical sulfhidrilo.**

El "Radical Sulfhídrico" (HS-), se adiciona a un doble enlace, dando un nuevo radical susceptible de reaccionar con otra molécula de hidrocarburo, eventualmente



con ácido sulfhídrico. El mercaptano formando se prestaría a diversas combinaciones:

- Formación por reacción de un doble enlace de un puente mono sulfurado, correspondiente a la pérdida de dos dobles enlaces por cada átomo de azufre.
- Oxidación por el azufre a un poli sulfuro, con formación de ácido sulfhídrico.
- Reacciona este mercaptano con otro originando un enlace poli sulfuro con pérdida de un enlace por "T" átomos de azufre.

El ácido sulfhídrico formando reaccionaria inmediatamente con el caucho, puesto que solo se han podido determinar trazas de este compuesto durante la vulcanización.

Esta estructura tridimensionalmente es más o menos apretada, por lo tanto, las movilidades de las moléculas disminuyen y, por consiguiente, la plasticidad disminuye, además la formación de moléculas gigantes aumenta las propiedades ligadas a este incremento de magnitud molecular.

En esta transformación se produce un brusco cambio en todas las propiedades del caucho cuya magnitud depende del calor entregado al compuesto en la vulcanización.

Las propiedades del caucho más influenciadas por la reacción del intracruzamiento son las siguientes:

- Modulo estático en tracción
- Elongación
- Rebote a alta temperatura
- Resistencia al desgaste
- Compresión set
- Generación de calor
- Resistencia al hinchamiento en líquidos

Menor influencia se ejerce en:

- Carga de rotura
- Rebote a temperatura ambiente
- Resistencia a la abrasión
- Flexibilidad a baja temperaturas
- Permeabilidad a los gases
- Resistencia eléctrica

Las siguientes propiedades están en su valor óptimo cuando el grado de vulcanización es levemente insuficiente.

- Resistencia al desgarre
- Agrietamiento por fatiga

Las siguientes propiedades estarán en su valor óptimo cuando el grado de vulcanización sea el óptimo.

- Carga de rotura
- Modulo
- Resistencia al envejecimiento
- Resistencia a la abrasión

Las siguientes estarán en su valor óptimo con un grado de vulcanización ligeramente excesivo:

- Rebote (resiliencia)
- Compresión set
- Resistencia al hinchamiento en líquidos
- Resistencia al ozono

Cuando el grado de vulcanización es el máximo y se sigue vulcanizando se llega a la REVERSION, en donde todas las propiedades empeoran.

La siguiente tabla muestra, en forma cronológica, hechos o descubrimientos fundamentales para la vulcanización del caucho natural.

**Tabla 2.18: Descubrimientos fundamentales para la vulcanización del caucho Natural**

1839	Charles Goodyear descubre la vulcanización del caucho natural usando azufre y fuego y óxidos orgánicos
1844	Patentamiento del proceso
1906-1915	Desarrollo de los acelerantes orgánicos
1919	Óxido de cinc es utilizado como activante para la vulcanización con azufre
1920	Se patentan los carbonatos y la TIOUREO
1921	Se patentan el MTB y el MTBS
1922	Se patentan las guanidinas y carbonato de base metálicas
1930	Se desarrollan los TIURANOS y las sulfamidas
1950	Se desarrolló el sistema EV

**a. Procesado y vulcanización con azufre**

Las Etapas del procesado son: preparación de componentes, dosificación y

Mezclado, conformado, Vulcanizado.

#### **b. Preparación de Componentes**

- Caucho virgen en forma de polvo o granza.
- Agente vulcanizante. Generalmente S en polvo Típicamente 0,5-4%p o a través de sulfur donors (alternativa: reticulación por peróxidos o con radiaciones).
- Componentes reguladores de la vulcanización:
  - Acelerantes: CBS (N-ciclohexil-tiazil-benzosulfona) ~ 0,5-2%p, sulfur donors como TMTD y TMTT (tetrametil-tiuram-disulfuro y tetrametil-tiuram-tetrasulfuro), DPTS (dipentametil-tiuramhexsulfuro), ZINEB (ditiocarbonato de zinc).
  - Activadores. Mejoran la eficacia de la reacción, dificultando la formación de largas cadenas y anillos de  $-S-$ : Ácidos grasos (esteárico) ~ 1-4%p y ZnO ~ 2-10%p o PbO<sub>2</sub>.
  - Retardadores. Ácido benzoico, anhídrido ftálico PTA y CTP.
- Componentes para alargamiento de la vida útil:
  - Aditivos antioxidantes: Protegen los dobles enlaces.
  - Difenilaminas, fenoles mono- y difuncionales, ceras parafíicas.
  - Retardadores de llama.
- Cargas:
  - Negro de carbono. Color negro.
  - SiO<sub>2</sub>. Transparencia.
  - TiO<sub>2</sub>. Color blanco.
  - Relleno para abaratar costes: CaCO<sub>3</sub>, BaSO<sub>4</sub>.
  - Tintes.
- Plastificantes (se llaman extenders si se trata de plastificar el efecto de un exceso de cargas):
  - Aceites parafínicos o aromáticos para cauchos apolares.
  - Ésteres para cauchos polares: DOP, DOS, TCP
- Componentes para mejora del procesado (además de los plastificantes):
  - Facticios (obtenidos de reacción de aceites vegetales y de pescado con compuestos de azufre): reducen el hinchamiento en a la salida de extrusoras y mejoran acabado superficial.
  - Gasificantes. En aplicaciones especiales.

**c. Medida de la plasticidad (viscosidad)**

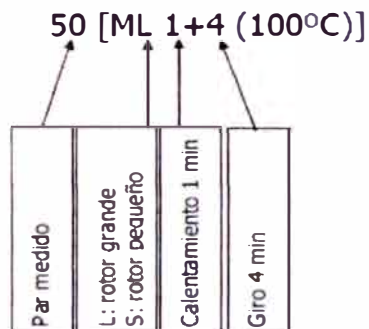
Con Plastómetro (viscosímetro) de Mooney se mide el par torsor necesario para giro de un rotor inmerso en la masa de la goma.



**Fig.2.19: Plastómetro (viscosímetro) de Mooney (Reómetro).**

**d. Medida de la viscosidad:**

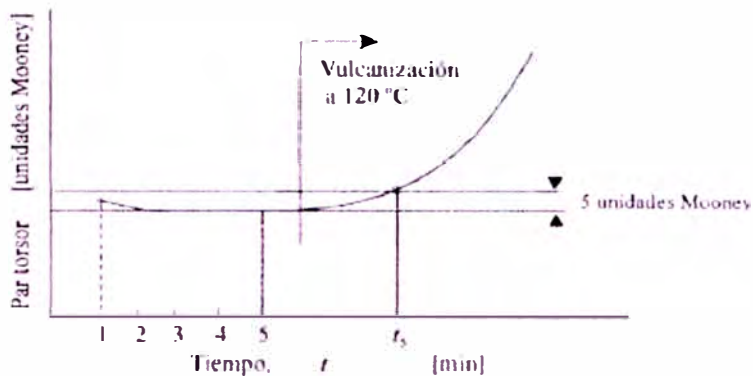
Se Mide la viscosidad de Mooney a 100°C y a 2 rpm de giro del rotor. Generalmente se emplea 1 min de calentamiento + 4 min de giro.



**Fig. 2.20: Interpretación de la medida de viscosidad Mooney especificada**

Medida del tiempo de vulcanización:

A 120°C se mide el "Tiempo de prevulcanizado de Mooney t<sub>5</sub>": tiempo en minutos para que el par torsor se incremente en 5 unidades.



**Fig.2.21: Vulcanización a 120°C, par torsor en función del tiempo de vulcanizado. Tiempo de pre vulcanizado Mooney  $t_s$ .**

**Conformado (Procesado de las gomas en verde)**

- Extrusión (alimentación en caliente Lhusillo~6-8D, en frío Lhusillo~16-20D).
- Calandrado. También para recubrimiento de sustratos (algodón, lana, pieles de termoplásticos).
- Moldeo por inyección. Moldes patrón de DuPont para estudio comparativo de fluidez:



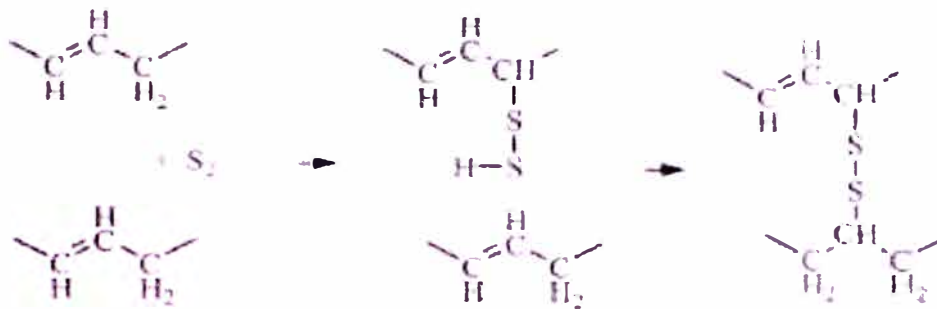
**Fig.2.22: Moldes patrón de DuPont para estudio comparativo de fluidez**

- Moldeo por compresión o por transferencia.
- Extrusión-soplado.
- Moldeo rotacional.

**e. Vulcanización**

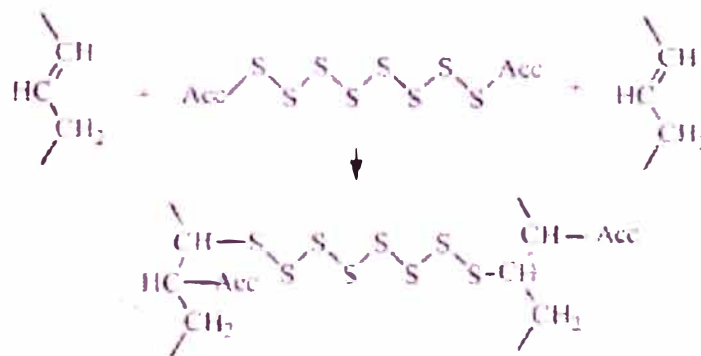
**Análisis del proceso:**

- Reacciones: adición de  $S_n$  a posición  $\beta$  de cadena + adición a doble enlace de otra molécula.



**Fig.2.23: Reacciones: adición de  $S_n$  a posición  $\beta$  de cadena + adición a doble enlace de otra molécula.**

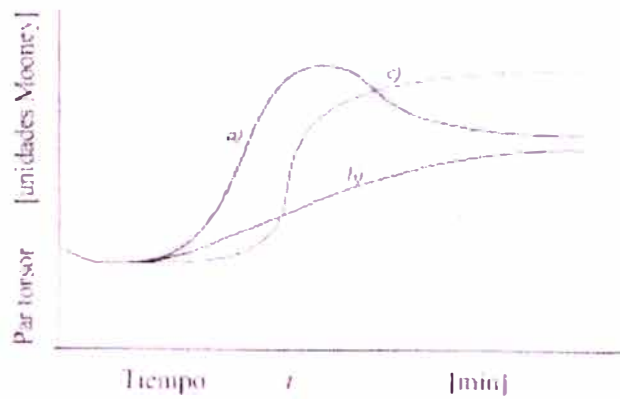
- Empleo de acelerantes: la idea que se tiene es que se unen a los extremos de  $(-S)_n$  para después formar la unión abriendo los dobles enlaces:



**Fig.2.24: Reacciones: Los acelerantes se unen a los extremos de  $(-S)_n$  para después formar la unión abriendo los dobles enlaces**

- Tiempo de reacción: muy lenta (horas...).

Estudio de la evolución con plastómetro de Mooney(reómetro): puede detectarse vulcanización precoz y reversión:



a) *Vulcanización rápida + reversión. b) vulcanización lenta. c) vulcanización retardada sin reversión.*

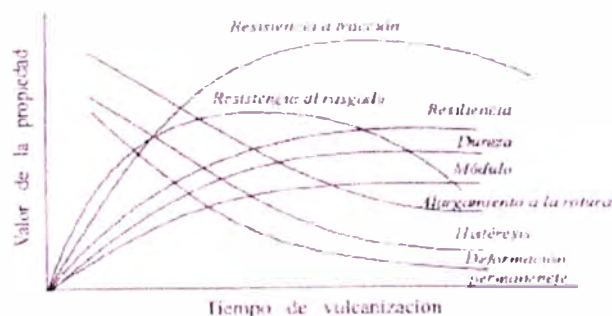
**Fig.2.25: Tiempo de reacción de la vulcanización estudiado con plastómetro de mooney (reómetro).**

Ejecución de la vulcanización:

- En el molde si se procesa mediante moldeo (por compresión, transferencia o inyección).
- Operación posterior al conformado:
  - Discontinua. En autoclaves calentados por vapor o aire caliente (Por ejemplo curado de rollos y bobinas, de cables recubiertos)
  - Continua. Por ejemplo perfiles extruidos de gran grosor en baños de sales fundidas, ondas de alta frecuencia para Láminas, en tren de rodillos calientes.

Influencia en las propiedades:

Duración óptima según características exigidas a la goma.



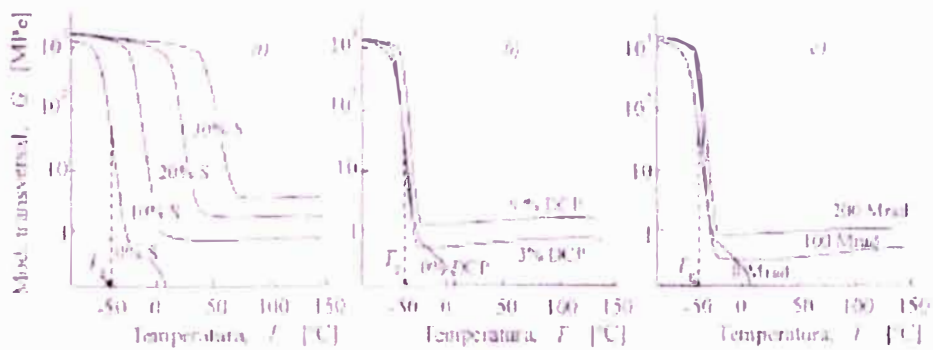
**Fig.2.26: Tiempo de vulcanización óptimo según valores de propiedad exigidas a la goma.**

- Cantidad de azufre: cuanto mayor es, mayor grado de reticulación, mayor Tg, rigidez y dureza.

Curvas G-T para NR. G (módulo transversal, MPa).

a) Vulcanización con S. b) con peróxidos orgánicos. c) reticulación con radiaciones

[nota: 1 Gy = 1 J/kg = 100 rad].



*Curvas G-T para NR. a) Vulcanización con S. b) con peróxidos orgánicos. c) reticulación con radiaciones*

*[nota: 1 Gy = 1 J/kg = 100 rad].*

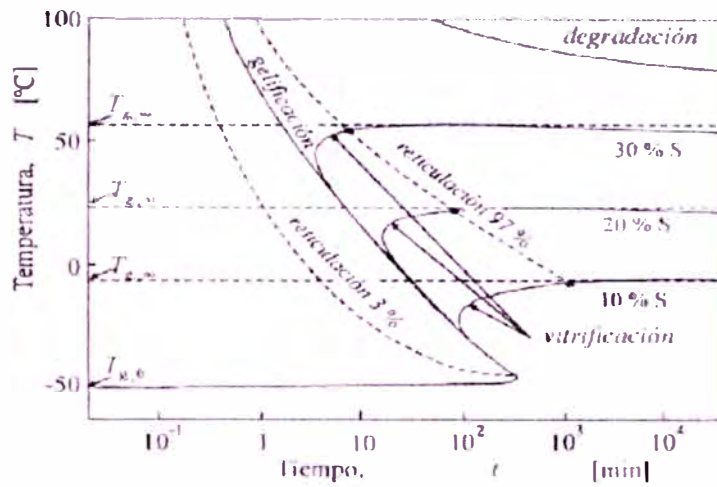
**Fig. 2.27: Curvas G-T para NR. G (módulo transversal, MPa). T (temperatura °C).**

Diagramas TTT:

Permiten representar los tiempos de reticulación y de vitrificación. En ellos puede leerse la temperatura necesaria de reticulación para un cierto grado.

Curvas TTT para una goma.





Curvas TTT para una goma.

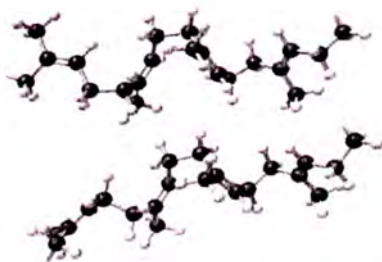
Fig. 2.28: Curvas TTT para una goma



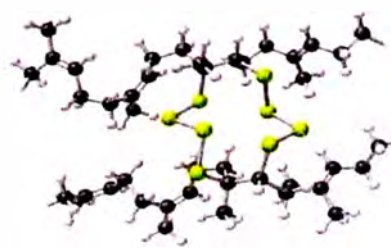
Fig. 2.29: Caucho sin vulcanizar, caucho vulcanizado, caucho vulcanizado y estirado.

**Cuadro 2.2: Efecto de la vulcanización en las propiedades del caucho.**

<b>Caucho sin vulcanizar</b>	<b>Caucho vulcanizado</b>
Baja tensión	Alta tensión
Alta retención	Baja retención
Termoplástico	Termofijo
Pegajosidad	Ausencia de pegajosidad
Baja viscosidad	Alta viscosidad
Alto ablandamiento	Bajo ablandamiento
Bajo módulo	Alto módulo
Bajo esfuerzo a la tensión	Alto esfuerzo a la tensión
Alta elongación	Baja elongación
Baja dureza	Alta dureza
Alta deformación permanente	Baja deformación permanente
Bajo rebote	Alto rebote
Alto hinchamiento ante solventes	Bajo hinchamiento ante solventes



Antes de vulcanización



Después de vulcanización

**Fig. 2.30: Estructura molecular del caucho antes de la vulcanización y después de la vulcanización.**

#### 2.4. Propiedades mecánicas del caucho (elastómero)

- Módulo de elasticidad de tracción (axial, transversal).
- Módulo de elasticidad de Flexión.
- Elongación
- Resistencia a la tracción (Carga de rotura)

- e) Compresión set
- f) Rebote (resiliencia)
- g) Rebote a temperatura ambiente
- h) Rebote a alta temperatura
- i) Flexibilidad a baja temperaturas
- j) Agrietamiento por fatiga
- k) Resistencia al desgarre
- l) Resistencia al desgaste(abrasión)
- m) Resistencia al envejecimiento
- n) Generación de calor
- o) Resistencia al hinchamiento en líquidos

**Tabla 2.19: Ensayos del caucho según ASTM**

<b>ASTM Standards for Rubber</b>	<b>ASTM Rubber Test Description</b>
ASTM D395	Compression Set Resistance
ASTM D412	Stress & Strain, (Tensile, Elongation & Modulus)
ASTM D429	Adhesion, Rubber to Metal Bonding
ASTM D471	Fluid Resistance, Chemical Compatibility
ASTM D573	Heat Ageing, Heat Resistance, Oven Ageing
ASTM D624	Tear Strength of Rubber
ASTM D1329	Low Temperature Performance
ASTM D1414	Testing of o-Rings
ASTM D1646	Mooney Viscometer
ASTM D2000	Classification of Rubber by Oil and Heat Resistance
ASTM D2084	ODR, Oscillating Disk Rheometer, (Curing Properties)
ASTM D2137	Low Temperature Brittleness
ASTM D2240	Durometer, Hardness of Rubber
ASTM D3182	Standard Practice for Mixing and Molding Rubber

**Tabla 2.20: Propiedades mecánicas a temperatura ambiente del caucho.**

Tabla 5 Propiedades mecánicas a temperatura ambiente

	Módulo de flexión (MPa)	Módulo de tracción (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa) <sup>1</sup>	Elongación de rotura (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación de rotura (%)	Abrasión Pérdida de volumen (mm <sup>3</sup> )	Resistencia al desgarro por tensión en probeta entallada (mN)	Recuperación con deformación de 100% a 21°C (porcentaje)	Recuperación de deformación del 300% a 21°C (porcentaje)	Tensión de retracción por deformación del 150% (MPa)	Deformación permanente por compresión a 21°C (porcentaje)	Relajación de la tensión con deformación del 50% <sup>2</sup>
L	12	5	-	-	10	1274	-	-	-	-	-	-	-
O*	695	589	-	-	31	1029	-	-	-	-	760	-	-
F*	57	46	-	-	12	824	93	339	78	65	400	42	-
5	30	24	14	951	16	1115	48	-	8,2	74	790	14	(3)
6	33	29	-	-	14	938	-	-	-	75	881	13	-
7	44	37	15	846	14	854	39	-	82	73	810	20	-
8	41	35	13	785	14	810	45	461	82	74	760	22	-
9	43	36	-	-	12	823	-	-	-	-	-	25	-
10	23	23	-	-	14	902	-	-	85	75	950	12	-
11	35	28	-	-	16	1090	-	978	89	66	510	14	4
12	20	17	12	901	13	931	-	1247	91	75	790	17	-
13	18	14	-	-	13	814	-	691	91	-	-	21	-
14	212	180	-	-	29	857	-	-	-	-	-	-	-
15	18	14	12	1127	16	1573	-	2074	89	83	770	18	-
16	23	20	-	-	12	968	-	-	88	83	1060	11	-
17	20	18	-	-	13	1252	-	1274	13	83	920	4	-
18	323	239	-	-	30	808	-	-	-	-	-	-	-
19	706	483	-	-	36	871	-	-	-	-	-	-	-
O*	15	15	-	-	17	1060	-	746	86	53	110	27	(6)
H*	16	15	-	-	15	829	-	599	8,2	60	180	23	-
J*	210	147	-	-	29	697	-	-	-	-	-	-	-
K*	-	-	-	-	32	609	-	-	95	96	1800	25	30

<sup>1</sup> ensayado a 51 cm/minuto  
<sup>2</sup> medido a 38°C durante 12 horas

**Tabla 2.21: Resumen de propiedades del NR vulcanizado**

Módulo de elasticidad	1 – 5 MPa
Tensión de rotura	20 – 30 MPa
Alargamiento de rotura	700 – 800 %
Punto de fragilidad	-30°C
Envejecimiento	Rápido para T>75°C y con O <sub>3</sub> .
Otros	Solvatación con aceites; permeables a los gases.
Efecto Mullins	Flexibilización en los primeros ciclos (~daño...)

#### 2.4.1. Resistencia mecánica

Entre todos los cauchos, el natural es el que presenta más marcadamente el fenómeno de cristalización; es esperable por lo tanto obtener de él muy buena resistencia mecánica, o sea, contra todo tipo de rotura (tracción, torsión, flexión, compresión, desgarre, abrasión, etc.).

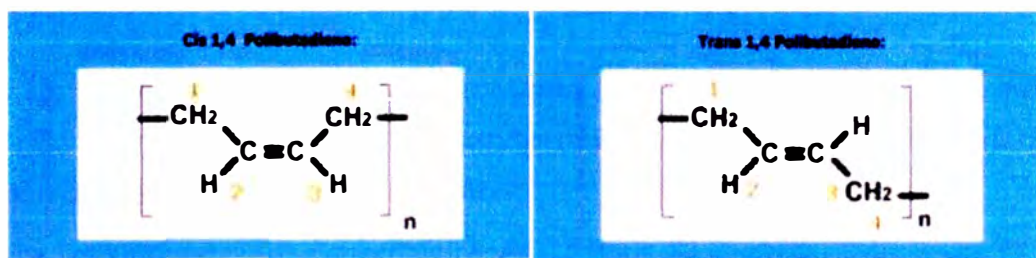
El natural es un caucho de gran cristalización porque sus cadenas moleculares tienen regularidad geométrica. La unidad que se repite, monómero, es en general geométrica: o sea que tiene una "cabeza" y una "cola"; es esencial para que el caucho cristalice que la posición dentro de la cadena sea siempre la misma, como se ve en el ejemplo de la figura.



**Fig. 2.31: Las cadenas moleculares del caucho natural tienen regularidad geométrica.**

En otros cauchos, esta regularidad no se presenta (sus moléculas están "enganchadas" al azar) y por lo tanto, la cristalización no se produce en la magnitud encontrada en el NR.

Esta regularidad geométrica no se da en un 100%, en el caucho natural, pues existen dos tipos de unidades monoméricas que, con los mismos átomos, varían su posición alrededor de la doble ligadura: se trata de las formas CIS y TRANS:



**Fig. 2.32: Unidades monoméricas de la molécula del caucho natural, tienen los mismos átomos pero varían su posición alrededor de la doble ligadura: formas CIS y TRANS.**

En la forma CIS, los átomos de carbono N° 1 y 4 están del mismo lado, mientras que en la forma trans, están cruzados.

El caucho natural normal pertenece a la forma CIS. La forma trans se llama Balata o Gutapercha, que tiene características de material plástico.

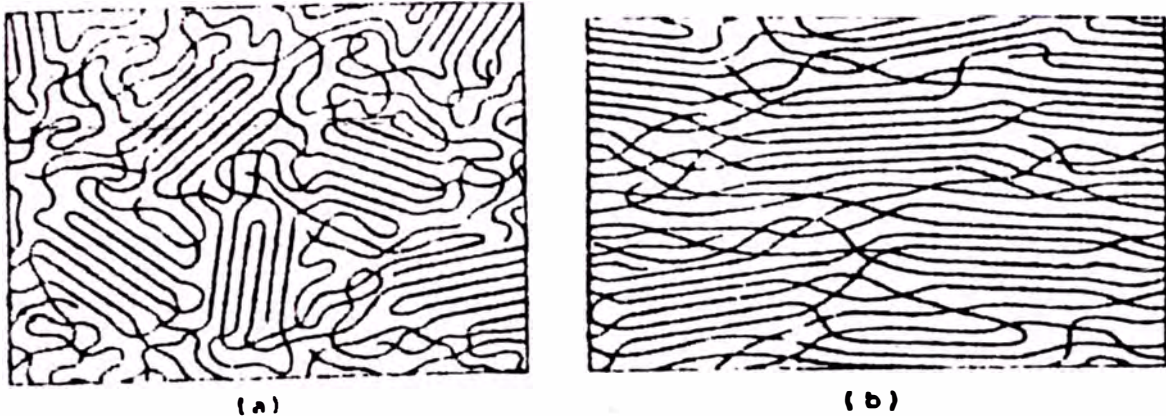
#### **a. Cristalización**

Las fuerzas de atracción entre moléculas definen el fenómeno de la cristalización del caucho natural. Al estirar el caucho, muchas moléculas están firmemente "atraídas" a otras y se oponen al resbalamiento que ocasiona la fluidez del caucho. Al seguir estirando el caucho, estas moléculas tienden a colocarse en la dirección del esfuerzo de estiramiento. Estos "cristales" restringen el movimiento de las cadenas del polímero, de manera que pueden considerarse como la causa de

la existencia de la fase elástica del caucho crudo.

Las moléculas que no forman "cristales" no están atraídas, pueden resbalar con otras, y se consideran como la causa de la existencia de la fase plástica en ese mismo caucho crudo,

En la figura se representa la estructura molecular del caucho natural:



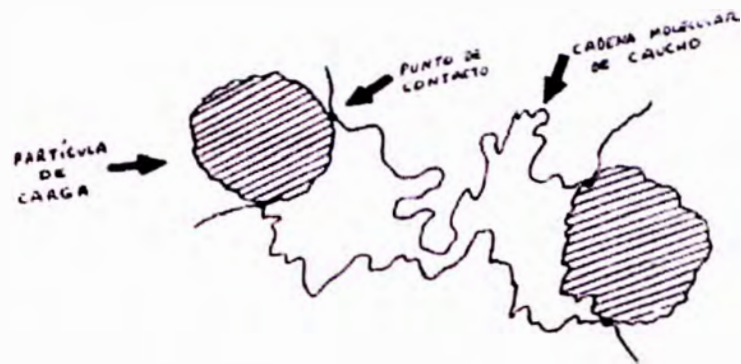
**Fig. 2.33: Estructura molecular del caucho natural: a) sin estirar y b) estirado.**

En el caso b se pueden observar muchas moléculas que se orientan en dirección de las fuerzas de estiramiento.

La capacidad de cristalizar de un caucho juega un rol muy importante en cuanto a su resistencia mecánica, ya que los "cristales" actúan como verdaderas fibras, de gran resistencia a la rotura.

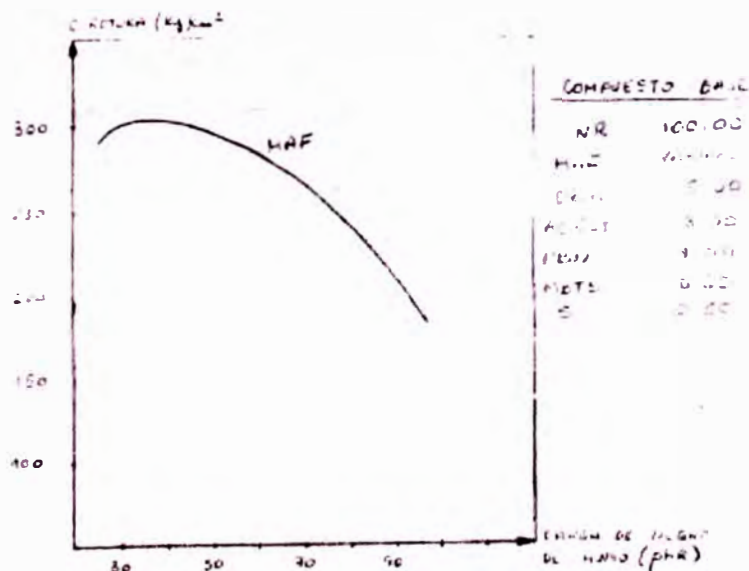
#### **Mejoramiento de la resistencia mecánica con cargas reforzantes**

Si se vulcaniza el caucho natural crudo, obtenemos un producto con una resistencia mecánica superior a la de cualquier caucho, sin embargo, se mejora aún más con cargas reforzantes que propician un íntimo contacto entre las moléculas del caucho natural, mejorando su módulo y sus propiedades de rotura. Esta mejora depende del tamaño de partículas de la carga, de su estructura y de la cantidad de carga.



**Fig. 2.34: Una carga reforzante propicia un íntimo contacto entre las moléculas del caucho natural, mejorando su módulo y propiedades de rotura. Entrecruzamiento semejante al que se crea en la vulcanización.**

Las partículas de carga, al atraer o "anclar" las moléculas de caucho natural restringen el libre movimiento o restablecimiento de estas últimas, aumentando así la viscosidad del compuesto.



**Fig. 2.35: Al formular un caucho natural, existe un valor óptimo de carga de negro de humo que se agrega al caucho natural para obtener la máxima carga de rotura.**

Hay una cantidad de negro de humo óptima que permite obtener la máxima carga de rotura debido a la acción de dos factores opuestos: el reforzado en sí y la dilución del caucho al aumentar las partes de negro. Existe así una curva como la

de la figura anterior para cada reforzante.

Para el caso del caucho natural y a diferencia de casi todos los demás elastómeros, la cantidad de carga óptima es relativamente pequeña; con sólo 30 - 35 phR de un negro reforzante ya se obtiene una excelente resistencia a la tracción. La interacción de las partículas de carga con el caucho natural puede deberse a tres factores esenciales:

**a. Factor Extensivo:**

Es la superficie o área total de contacto entre la carga y el elastómero, directamente vinculada con el tamaño de partícula de aquella.

El área específica de la carga es los  $m^2$  por gramo de carga utilizada en dicho contacto. Varía entre 1  $m^2/g$  para cargas minerales semireforzantes hasta 1000  $m^2/g$  en los negros de humo más finos.

Otra forma de cuantificar el reforzado es con los  $m^2$  de superficie de contacto por  $cm^3$  de goma, con esta nueva medida no solo se tiene en cuenta el tamaño de las partículas si no también la cantidad total de carga; ambos factores influyen el grado de reforzado obtenido.

Así un típico compuesto de 50phR de negro de humo ISAF (N-220) tiene 35  $m^2$  de superficie de contacto por  $cm^3$  de compuesto; si cambiamos 50 hpR de HAF esa cantidad se reduce a 25  $m^2/cm^3$ . Por debajo de 6  $m^2/cm^3$  prácticamente no se logra reforzar el caucho.

**b. Factor Intensivo:**

Es la naturaleza química de las partículas de carga que juega un importante rol en su efecto sobre la velocidad de vulcanización de los compuestos de caucho natural.

En otro aspecto, es importante la acidez de la carga y su poder de absorción superficial ya que estos factores pueden alterar sensiblemente la curva reométrica del compuesto.

**c. Factor Geométrico:**

Se refiere a la estructura de la carga, es decir su grado de agregación. La estructura del negro de humo es medida a través del INDICE DBP, por la cantidad porcentual de Dibutilftalato absorbida por el negro.

El caucho formulado y vulcanizado posee elementos elásticos (cadenas moleculares vinculadas por puentes de vulcanización o partículas de carga) y elementos plásticos o viscosos (porciones de cadenas moleculares que al no estar



vinculadas resbalan entre sí). Por esta razón el caucho es considerado un material visco elástico.

### Elasticidad del caucho natural: Relaciones tensión – deformación, Resistencia a la tracción

Si a una barra metálica de longitud  $L_0$  y sección  $A$  se la somete a fuerzas de estiramiento  $F$ , la barra se estira hasta una longitud  $L$  que depende de las fuerzas aplicadas; es decir, desde su posición original, se estira un  $\Delta L$ .

Denominamos tensión de tracción  $\sigma_t$  al cociente  $\frac{F}{A}$ , o sea la fuerza por unidad de sección ( $\text{Kg/cm}^2$ ).

Denominamos elongación  $\varepsilon$  al cociente  $\frac{\Delta L}{L_0}$  y  $E$  ó  $e$  a  $\varepsilon \times 100$ , o sea el porcentaje de estiramiento con respecto a la longitud original.

En un sólido ideal, 100% elástico, las tensiones  $\sigma_t$  son directamente proporcionales a las elongaciones  $\varepsilon$  (ley de Hooke):  $\sigma_t = K \times \varepsilon$

Donde  $K$  es el módulo de elasticidad del material. Si se duplica la tensión, se duplica la elongación; triplicando la tensión se triplica la elongación, etc. o sea la relación entre tensión y elongación es lineal, ver figuras:

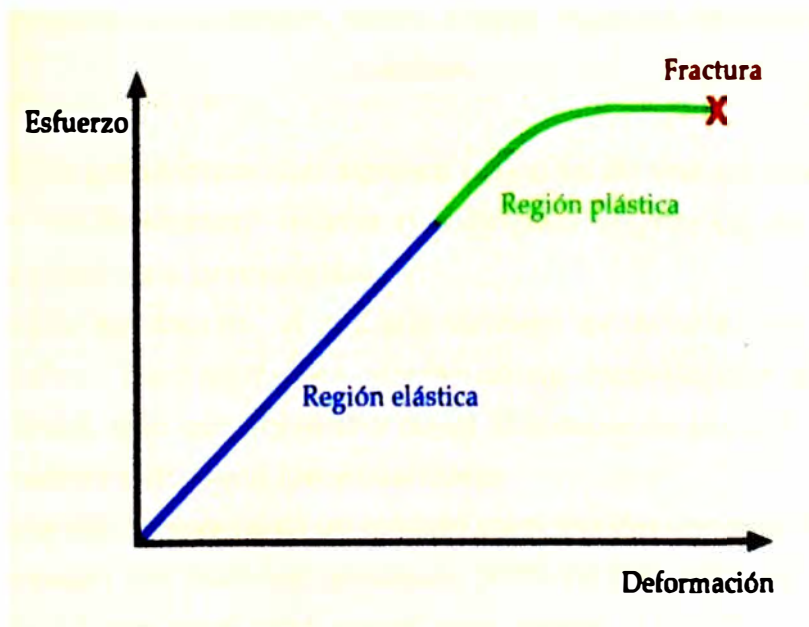
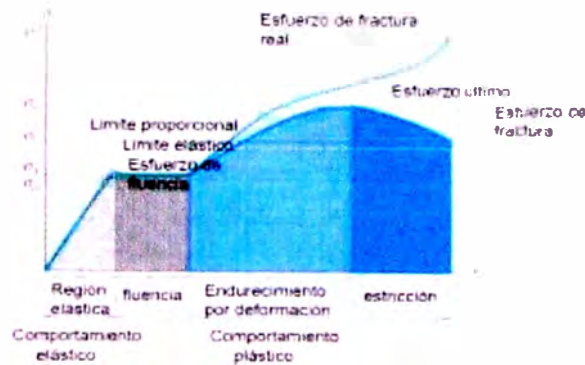
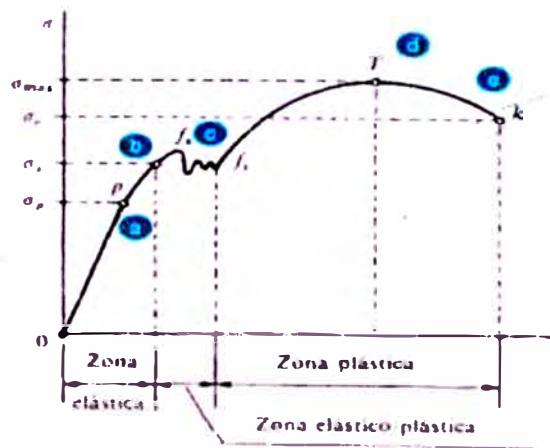


Fig. 2.36: Tensión– elongación (alargamiento, deformación), hierro fundido.



**Fig. 2.37: Tensión– elongación (alargamiento, deformación), acero.**



**Fig. 2.38: Tensión – elongación, acero. Zonas: elástica, elástico-plástica, y plástica.**

Esta ley de proporcionalidad significa que si se elimina la fuerza  $F$ , la barra de este sólido "100% elástico" retorna a la longitud original  $L_0$ , es decir, no hay deformaciones plásticas o permanentes.

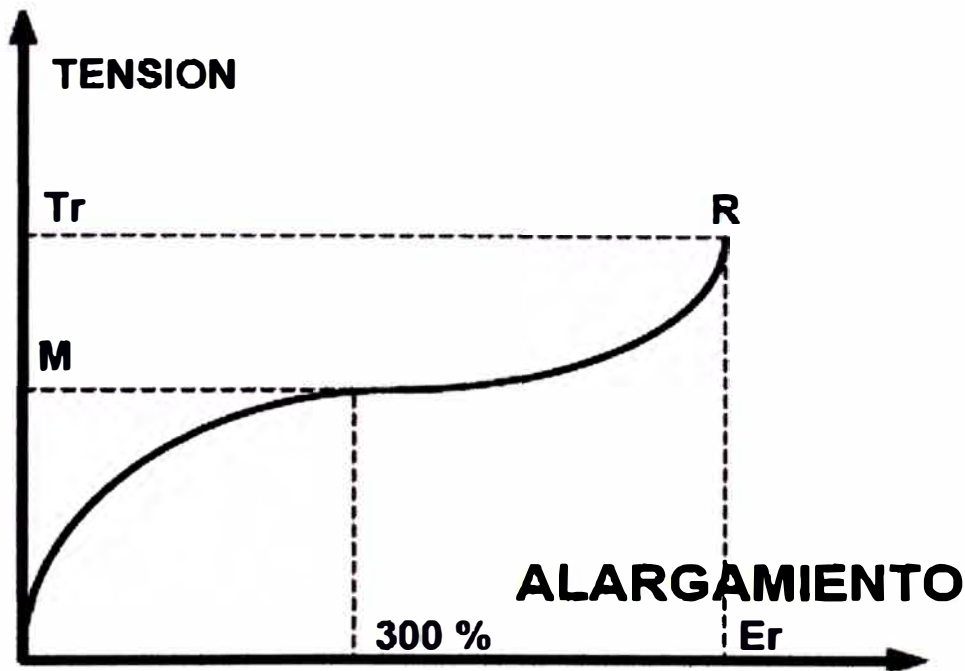
En el caso del caucho, al estirarlo también existe una tensión para cada elongación (módulo). Pero dadas sus características viscoelásticas la relación entre  $\sigma_t$  y  $\epsilon$  no es lineal, sino que sigue una curva que depende del tipo de caucho, de cómo está formulado y de cómo fue vulcanizado:

Cada punto de la curva representa un módulo para una determinada elongación. En especial se destacan dos módulos: el módulo 300% ( $M_{300}$ ) y el módulo de rotura o carga de rotura ( $C_r$  que es el módulo que corresponde a la última elongación o % elongación de rotura ( $E_r$ ).

La forma de esta curva módulo-elongación, es una combinación entre la ley lineal correspondiente a la fase elástica del compuesto y otra completamente

irregular que corresponde a la fase plástica o viscosa.

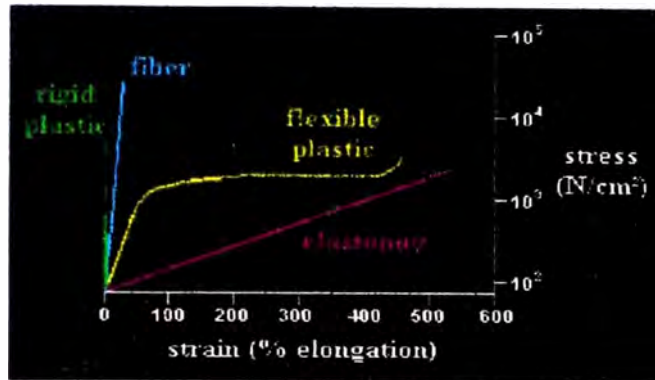
Si solicitamos a la tracción a una probeta de dimensiones apropiadas y graficamos nuevamente la tensión en función del estiramiento para un compuesto de caucho tendremos la siguiente curva:



**Fig.2.39: Esta curva tiene una serie de parámetros o puntos singulares que se utilizan para definir las propiedades físicas de los compuestos (módulo, parámetros de rotura)**

El módulo ( $M$ ) es la tensión necesaria para estirar la probeta hasta un valor determinado que, normalmente, se fija en 300 % respecto de la longitud original. El módulo está relacionado, para una formulación dada, con la densidad de entrecruzamiento, esto es, con el número de puentes de vulcanización que se formaron en la unidad de volumen.

Por lo tanto su valor no sólo dependerá del tipo de sistema de vulcanización sino también del tiempo y temperatura de cura. Además el reforzado del caucho con cargas tiene una marcada influencia sobre esta propiedad, no sólo con el tipo de carga sino con la cantidad existente en la formulación.



After Odian, George; *Principles of Polymerization*, 3rd ed., J. Wiley, New York, 1991, p.34.

**Fig. 2.40:** curvas Tensión(N/cm<sup>2</sup>)-deformación (% elongación): de plástico rígido, fibra, plástico flexible y elastómero.

**Tabla 2.22:** Resistencia a la tracción (MPa) y su correspondiente elongación (%) para diversos materiales industriales.

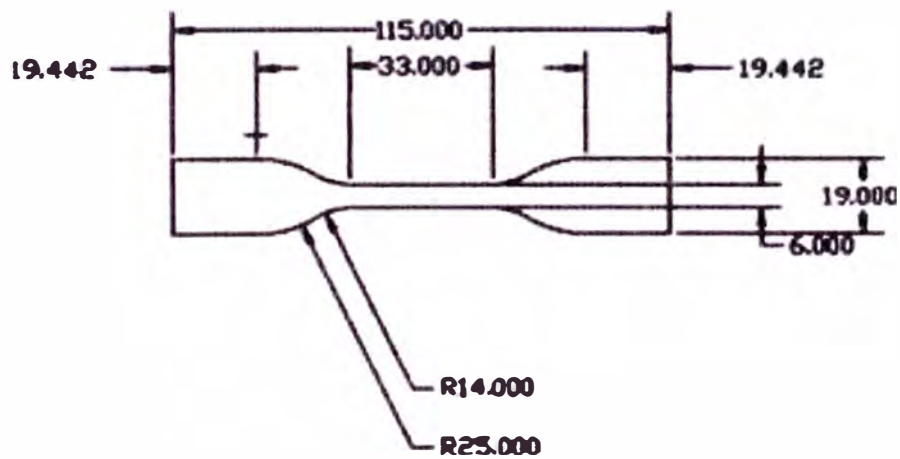
Material	Resistencia a la tracción	Elongación
Piel	50 MPa	75%
Kevlar	3000 MPa	3 %
Caucho	30 MPa	600%
Silicona	5,5 MPa	530 %
Cristal	403 MPa	0%
Cerámica	241 MPa	0%
Latón	530 MPa	5%
Acero 316L	620 MPa	51%
Cobalto	820 MPa	18%
Bronce	700 MPa	11%
Titanio Grado 2	2 490 MPa	26%

**Mediciones de la Resistencia a la Tracción con Ensayo normalizado: ISO 337 ó ASTM D 412.**

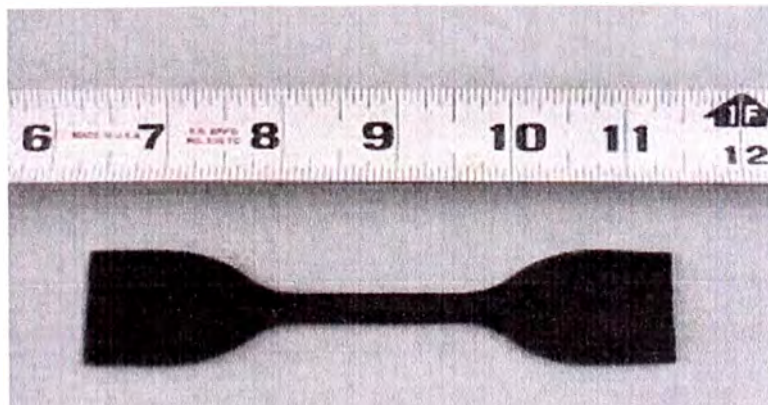
La resistencia a la tracción de un compuesto es una propiedad muy sensible a la estructura microscópica del material: pequeñas variaciones en el grado de dispersión de la mezcla, que no influyen tanto sobre otras propiedades, producen en este caso un notable efecto sobre la ocurrencia y sobre la forma de rotura del material, que falla en los puntos más débiles del mismo.

Aunque las piezas de caucho, en la realidad, se usan muy poco bajo esfuerzos de extensión (tracción), la resistencia a la tracción es una de las mediciones más usadas después de la dureza, para caracterizar la calidad del compuesto. Es también una propiedad muy sensible a errores de proceso, principalmente en las operaciones de pesado y mezclado y en vulcanización.

Las probetas que se pueden utilizar para este ensayo son las de tipo dumbbell, salterio, tiras paralelas o anulares. Las más comunes son las del tipo dumbbell, cuyos espesores van de 1.3 a 3.3 mm. El ancho más usado es el de 6mm. Se cortan de planchas moldeadas o se preparan a partir de piezas finales.



**Fig.2.41: Dimensiones de la Probeta Dumbbell, la más común para ensayo de resistencia a la tracción del caucho.**



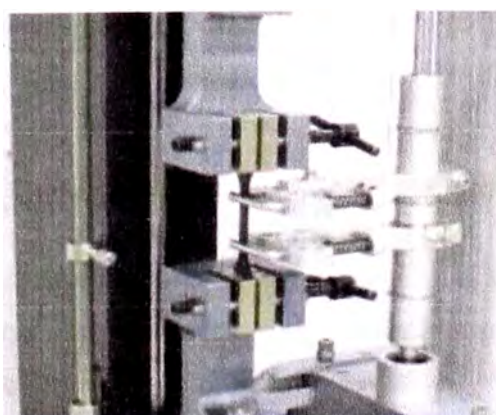
**Fig. 2.42: Probeta obtenida por calandrado, forma característica (dumbbell). Velocidad de deformación constante. Antes de realizar el ensayo, el espesor se mide en tres puntos a lo largo de la parte central de la probeta y se promedian los valores obtenidos.**

Antes de realizar el ensayo, el espesor se mide en tres puntos a lo largo de la parte central de la probeta y se promedian los valores obtenidos. El ancho no se mide, ya que se toma por convención el ancho del troquel.

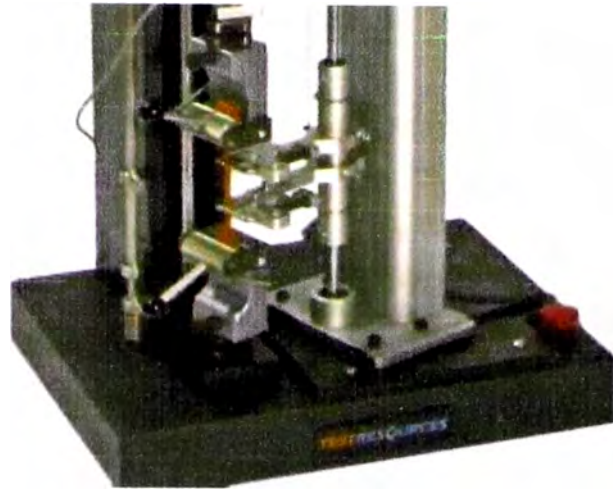
Las probetas se montan en el dinamómetro en mordazas que aseguran la distribución uniforme de las tensiones.



**Fig.2.43: Dinamómetro Instron para el ensayo de resistencia a la tracción del caucho.**



**Fig.2.44: Dinamómetro-mordazas-probeta y extensómetro.**



**Fig.2.45: Dinamómetro-mordazas-probeta y extensómetro.**

En general, la extensión se mide con un extensómetro con sujetadores paralelos en la parte central de la probeta, de modo de evitar deslizamientos pero sin interferir en la fuerza de extensión. Los extensómetros ópticos solucionan este problema pero son muy caros y además, en algunos materiales, es difícil el marcado óptico para que el dispositivo pueda seguir las marcas.

**a. Características medidas en tracción simple:**

- Módulo de rigidez secante para  $e$  (porcentaje de la elongación) cercano al 300%.
- Carga de rotura
- Deformación de rotura.
- Deformación permanente después de 10 minutos en relajación a  $e=75\%$ .

También, para el ensayo de resistencia a la tracción, se puede emplear probetas en forma de anillos que se cortan de una plancha con un cortador rotativo o de tubos, lubricando la hoja de sierra con jabón. Se montan en un dispositivo con ejes de 4.75 mm, que a su vez tiene un lubricante que no afecta el compuesto y facilita el desplazamiento para igualar las fuerzas a ambos lados del eje.

Pero la deformación no es uniforme y la parte interior de la circunferencia está más deformada que la exterior, por lo que los valores obtenidos con esta probeta son menores que con las dumbell. Pero, por otro lado, se colocan más fácilmente y la elongación se mide como la separación de ejes sin necesidad de extensómetro, lo cual es una ventaja si la medición se hace a temperaturas distintas de la ambiente porque los extensómetros no funcionan a esas temperaturas. El control del estado de los troqueles es fundamental para no introducir errores en la medición.

## **Medición de Compression Set con Ensayo de compresión normalizado: ASTM D 395, ASTM D 1229.**

Empleando Probetas en forma de discos cilindricos de 12.5mm de espesor, según los siguientes Métodos y medidas:

### **a. ASTM D 395:**

- Método A: compresión a fuerza constante provoca Fluencia (deformación retardada).
- Método B: deformación impuesta (25%) durante un tiempo (cerca de 22h) a T más o menos alta (70°C) provoca Relajación. Tras 30 min después de descargar: hay deformación permanente a compresión. Típicamente entre 10-15% después de ensayo con método B. (Recuperación a baja temperatura: ASTM D 1229).

### **b. ASTM D 575:**

Diagramas tensión-deformación (compression-deflection), módulo G. La deformación permanente final se denomina **Compresión set**. Esta propiedad determina el grado de recuperación experimentado por un material reticulado después de que se le ha retirado una carga constante aplicada durante un determinado tiempo.

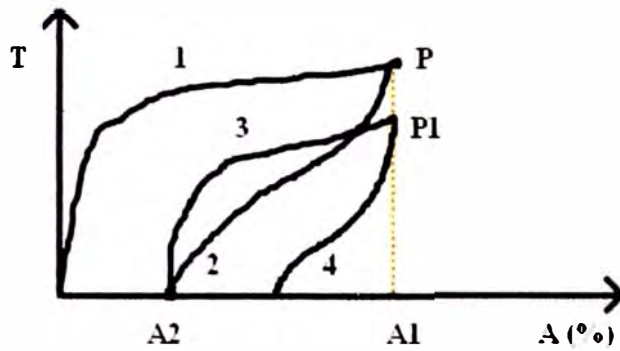
## **Propiedades relacionadas con la viscoelasticidad:**

### **a. Histéresis:**

Cuando los materiales Viscoelásticos son deformados, la fase plástica o viscosa consume energía y retarda la deformación elástica. Además se disipa una cierta cantidad de energía en el proceso de retorno a las dimensiones originales. Existe entonces una diferencia entre la energía que se le entregó al material y la que éste verdaderamente utiliza para deformarse elásticamente. Esta diferencia se denomina Histéresis. Los elementos viscosos son los responsables de la diferencia de energías entre el trabajo consumido y el disipado. Esto se observa tanto en el estado crudo como en el vulcanizado.

Si se efectúan ensayos de carga-deformación con una tira de caucho crudo hasta un determinado alargamiento y luego se revierte dicha deformación, se obtienen gráficos del siguiente tipo:





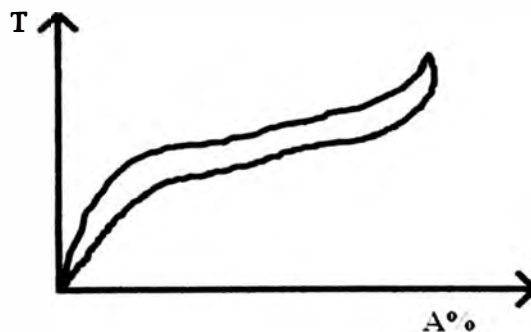
**Fig. 2.46: Existe una diferencia entre la energía que se le entregó al caucho crudo y la que éste verdaderamente utiliza para deformarse elásticamente.**

El gráfico ilustra este comportamiento. Al realizar el camino de retorno la curva obtenida no se superpone con la inicial. El área comprendida entre la curva 1, la ordenada PA1 y el eje de abscisas es proporcional a la energía entregada a l caucho para deformarlo y el área comprendida entre la curva 2, la ordenada PA1 y el eje de las abscisas es proporcional a la energía restituida por el caucho durante su retracción. El hecho de que la segunda área sea más pequeña muestra que la energía restituida por el caucho es menor que la energía gastada en deformarlo. Si se repite el ensayo sobre la misma probeta se obtienen nuevas curvas completamente distintas de las primeras (3 y 4).

Queda demostrado así que la estructura interna del caucho crudo fue modificada por el primer ensayo. Si los ensayos se repiten se obtienen áreas que van disminuyendo y tendiendo a un límite.

Si repetimos este procedimiento muchas veces, las curvas tenderán a un equilibrio y el área encerrada entre la "ida" y el "retorno" se denomina ciclo de histéresis, que sería nulo si el compuesto fuera 100% elástico.

En el caucho vulcanizado se observan los mismos fenómenos pero más atenuados.



**Fig.2.47: la vulcanización no anula por completo la componente viscosa del compuesto.**

En los compuestos vulcanizados, el área es mucho menor pero no desaparece, por lo cual el aspecto de la curva es el que se muestra en la figura 2.3. Con esto se comprueba que la vulcanización no anula por completo la componente viscosa del compuesto.

El caucho formulado y vulcanizado posee elementos elásticos (cadenas moleculares vinculadas por puentes de vulcanización o partículas de carga) y elementos plásticos o viscosos (porciones de cadenas moleculares que al no estar vinculadas resbalan entre sí). Por esta razón el caucho es considerado un material viscoelástico.

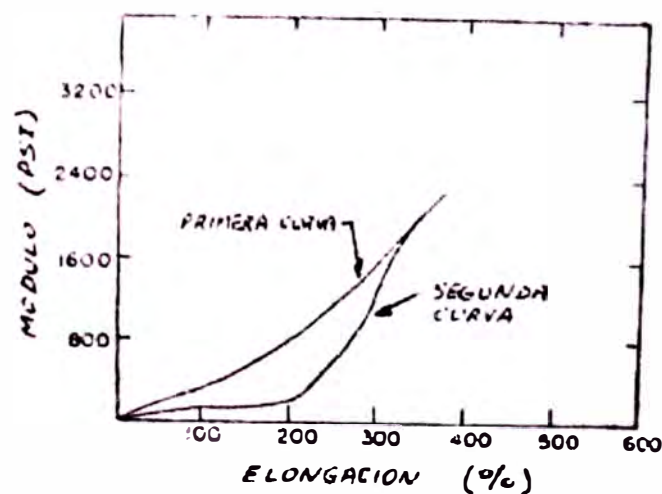
Cuando el caucho es deformado, los elementos viscosos son los responsables de la diferencia de energías (la entregada al compuesto menos la que éste utiliza para deformarse elásticamente). Esa diferencia de energía se denomina Histéresis.

#### b. Efecto ablandamiento o efecto Mullins

Si en vez de romper la probeta la estiramos sucesivamente, se tendrá una curva para cada uno de los sucesivos estiramientos pero con la particularidad de que en cada caso la curva se desplaza hacia abajo:

Esta experiencia demuestra que en cada estiramiento el módulo 300% es cada vez menor.

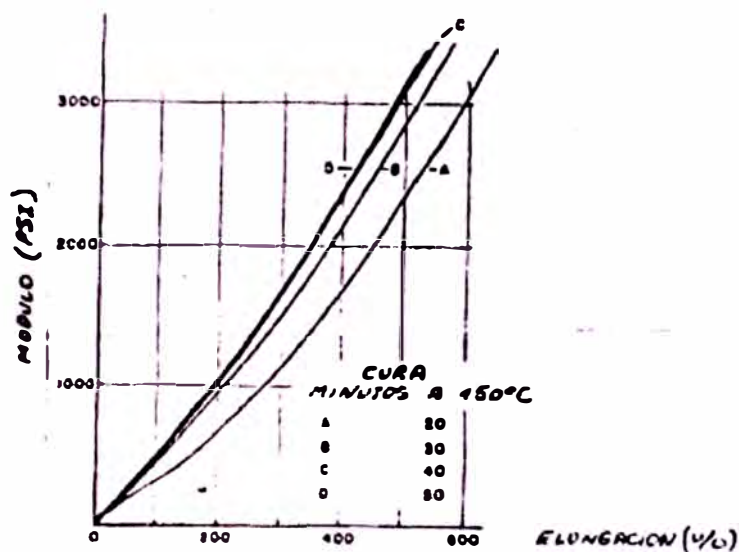
Debido a su característica de cristalización, el efecto ablandamiento en el caucho natural es bastante menor que en otros cauchos.



**Fig.2.48: Efecto de ablandamiento o efecto Mullins: En la segunda curva de estiramiento el módulo 300% es menor y así sucesivamente.**

Como el módulo es una medida del grado de vulcanización, es fácil concluir que la curva tensión - elongación depende de las condiciones de cura, esto es, de la temperatura y tiempo de vulcanización.

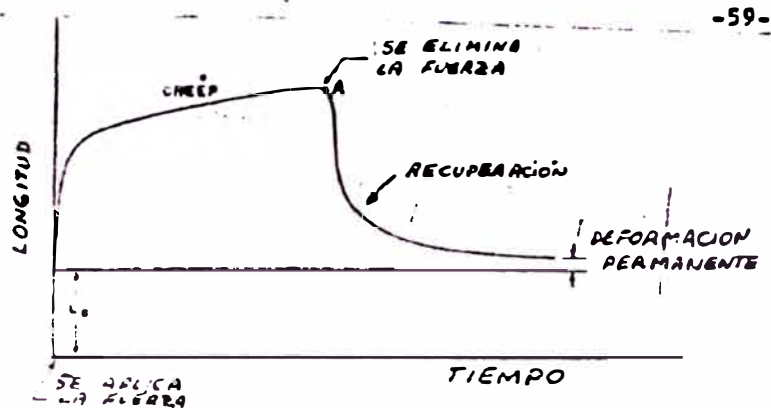
Como se observa en la figura, a medida que aumenta el tiempo de vulcanización, el módulo 300% aumenta y la elongación de rotura disminuye; podemos decir que el compuesto se vuelve más rígido al vulcanizarse más. Sin embargo, el efecto ablandamiento disminuye al aumentar la cura, porque también disminuye la fase plástica del compuesto, responsable de dicho efecto.



**Fig.2.49:** a medida que aumenta el tiempo de vulcanización, el módulo 300% aumenta y la elongación de rotura disminuye;

**c. Efecto Creep**

Si se aplica una pesa (tensión constante) sobre una tira de goma colgada de un soporte fijo. A medida que transcurre el tiempo la longitud de la tira de goma (elongación) aumenta y su magnitud también depende de la fase plástica.



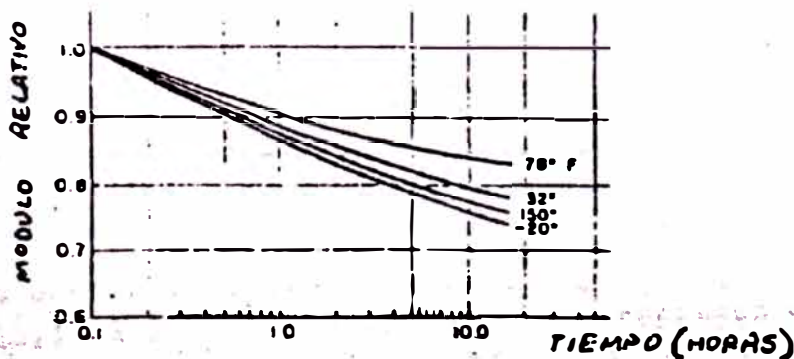
**Fig.2.50: Curva efecto Creep que resulta de estirar una tira de goma a tensión constante durante un tiempo, al eliminar la tensión, la tira tiende a recuperar su longitud inicial, pero ésta queda deformada permanentemente con una longitud final algo mayor.**

Si en un momento dado (punto A) se elimina la pesa, la tira tiende a volver a su longitud inicial ( $L_0$ ), Recuperación, pero al final de la experiencia se descubre que nunca llega al valor inicial: la tira queda deformada permanentemente.

Si se realiza el ensayo a compresión en lugar de a la tracción, esa deformación permanente se denomina compression set.

**d. Relajación de esfuerzo:**

Si efectuamos un estiramiento a un compuesto de caucho natural y detenemos el ensayo a una cierta elongación, ocurre como si, a través del tiempo, el esfuerzo (tensión necesaria para mantener esa elongación) necesario para mantener estirada la goma es cada vez menor.



**Fig.2.51: Gráfica del módulo relativo para mantener una elongación del 100% en función del tiempo y a distintas temperaturas.**

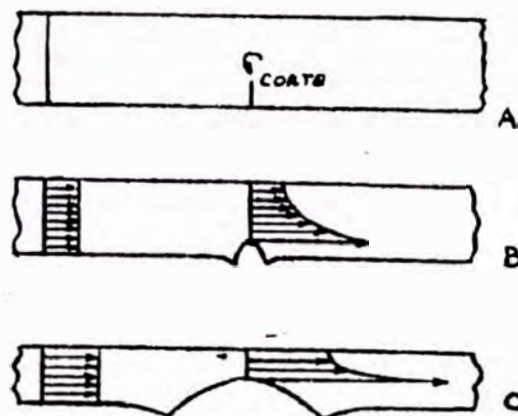
En la figura anterior se grafica el módulo relativo para mantener una elongación del 100% en función del tiempo y a distintas temperaturas. Todos los fenómenos descritos (Creep, efecto ablandamiento, histéresis, relajación de esfuerzo y deformación permanente) dependen del contenido de fase plástica en el estado Vulcanizado del caucho natural; de por sí este caucho tiene una fase plástica pequeña pero depende del grado de vulcanización obtenido.

**e. Resistencia al desgarramiento del caucho natural:**

La resistencia del caucho natural, bien formulado, al desgarramiento puede considerarse como muy buena.

La carga de rotura de un compuesto es en alguna medida, un índice de su resistencia al desgarre. Sin embargo, el desgarre es medido a través de probetas con discontinuidades geométricas (cortes, ángulos, etc.)

En la figura A se representa una probeta donde se ha efectuado un pequeño corte.



**Fig.2.52: El desgarre es medido a través de probetas con discontinuidades geométricas (cortes, ángulos, etc.).**

En la figura B se somete a la probeta a un pequeño estiramiento. Se puede observar la INICIACIÓN del desgarre, dibujo

A la izquierda están representadas las tensiones de estiramiento o tracción que son uniformes. A la derecha las tensiones de desgarre que no son uniformes sino que se concentran en el vértice del corte que se va desgarrando.

En el desgarre, la rotura de una cadena molecular ocasiona la rotura de otra y así sucesivamente. El hecho que el caucho esté reforzado por una carga, favorece

obviamente la resistencia al desgarre, ya que las partículas de carga redistribuyen las tensiones evitando la propagación catastrófica del desgarre.

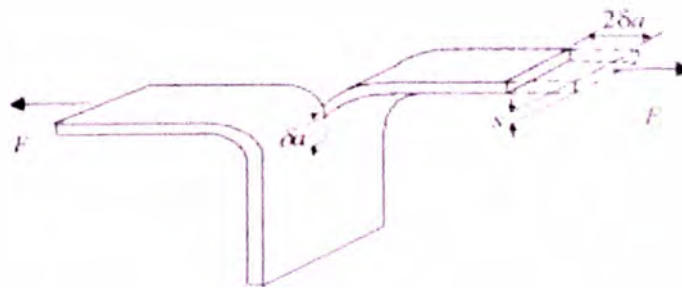
Las mejores condiciones para formular el NR (natural rubber) intentando tener buena resistencia al desgarre son las que propician la obtención de alta carga de rotura con bajo módulo; es decir, un compuesto resistente a la rotura y flexible al mismo tiempo.

**f. Resistencia al rasgado (tear strength)**

Láminas de gomas, propagación de fisuras en modo III (rasgado) [p.e. tracción de una hoja de papel fisurada...].

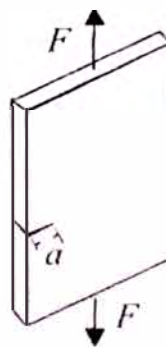
**Obtención de la resistencia al rasgado R con Ensayos de rasgado Normalizado: Norma ISO 34 ó ASTM D 624.**

Método Típico: rasgado de probeta tipo pantalón:

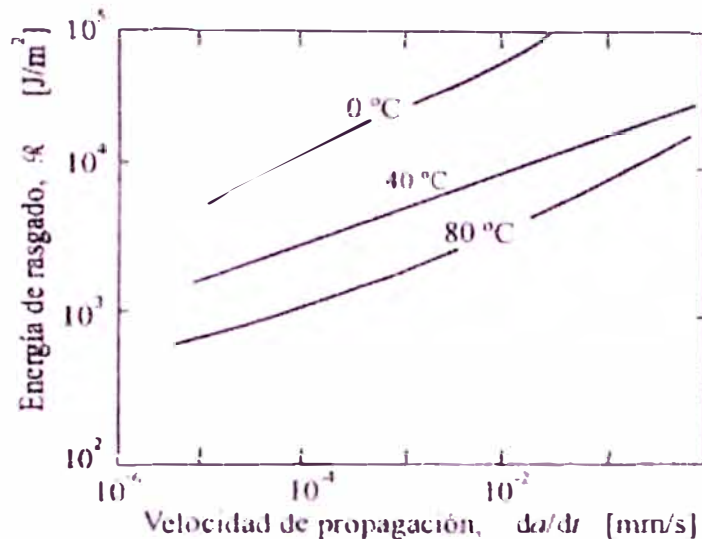


**Fig.2.53: El desgarre es medido a través de probetas con discontinuidades geométricas (cortes, ángulos, etc.).**

Método con Probetas rectangulares:



**Fig.2.54: El desgarre es medido a través de probetas con discontinuidades geométricas (cortes, ángulos, etc.).**



**Fig.2.55: El desgarro es medido a través de probetas con discontinuidades geométricas (cortes, ángulos, etc.).**

El Crecimiento de grietas está muy influenciado por el ambiente agresivo (aceites minerales, ozono...).

**g. Resiliencia del caucho natural:**

Es la habilidad del caucho para absorber energía en su fase elástica. Se mide en unidades de energía por unidad de volumen requerido para someter el caucho a esfuerzos de tensión desde cero hasta el límite del rango elástico considerado (300 % de elongación).

En el caucho vulcanizado se define la Resiliencia como la relación entre la energía restituida después de una deformación y la energía total suministrada para producir dicha deformación. La resiliencia depende de la velocidad de deformación. La resiliencia o rebote de un caucho es una medida de su elasticidad durante esfuerzos dinámicos. Se le puede cuantificar como la proporción de la energía usada en el rebote con respecto a la energía entregada en el impacto.

Una forma en principio sencilla de determinarla es a través del rebote de un péndulo tras su impacto en la goma, en cuyo caso se denomina resiliencia por rebote.

En el ensayo de resiliencia se emplean péndulos que golpean a la muestra con una determinada velocidad de impacto y desde una cierta altura inicial. Luego

del choque, el péndulo rebota hasta una altura que depende de la formulación del compuesto.

La resiliencia se puede medir como la relación entre la altura de rebote y la altura inicial expresada como porcentaje.

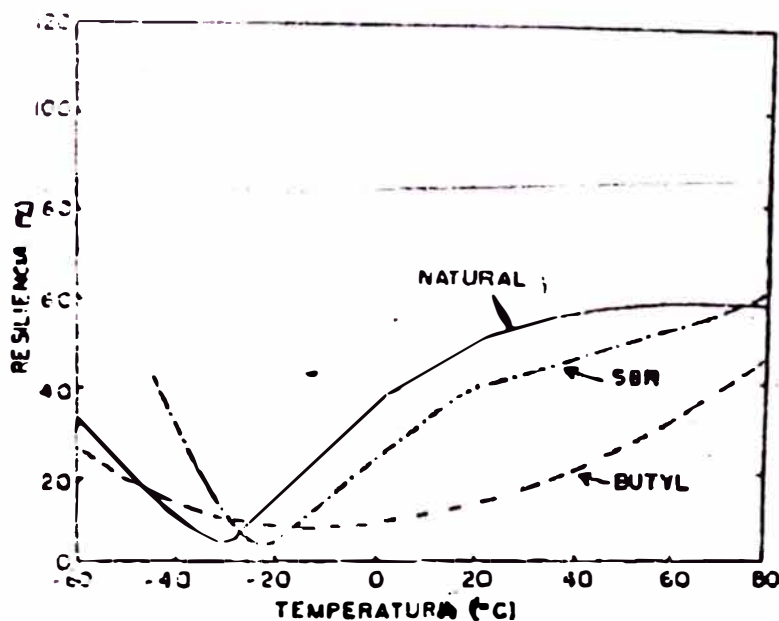
Los tipos de péndulos más usados son:

- Péndulo Lopke
- Péndulo Schob
- Péndulo Dumlop

Los ensayos de rebote con los distintos péndulos han demostrado que es muy difícil obtener resultados análogos con los distintos equipos ,ya que los mismos son influenciados por el peso del martillo, diseño de la cabeza del martillo, altura de caída, penetración y por la energía absorbida por el aparato durante el impacto. En cualquier ensayo de rebote, la muestra debe ser preconditionada con por lo menos 6 impactos antes de comenzar a registrar los datos definitivos.

La capacidad de rebotar de un compuesto depende de sus propiedades (principalmente del módulo) que definen la proporción de fase elástica.

El caucho natural como se observa en la figura presenta excelentes condiciones de resiliencia en comparación con otros cauchos.



**Fig.2.56: El caucho natural tiene excelentes condiciones de resiliencia frente a otros cauchos.**



Esta situación, sin embargo, no se presenta a muy bajas temperaturas, ya que pierde gran parte de su elasticidad.

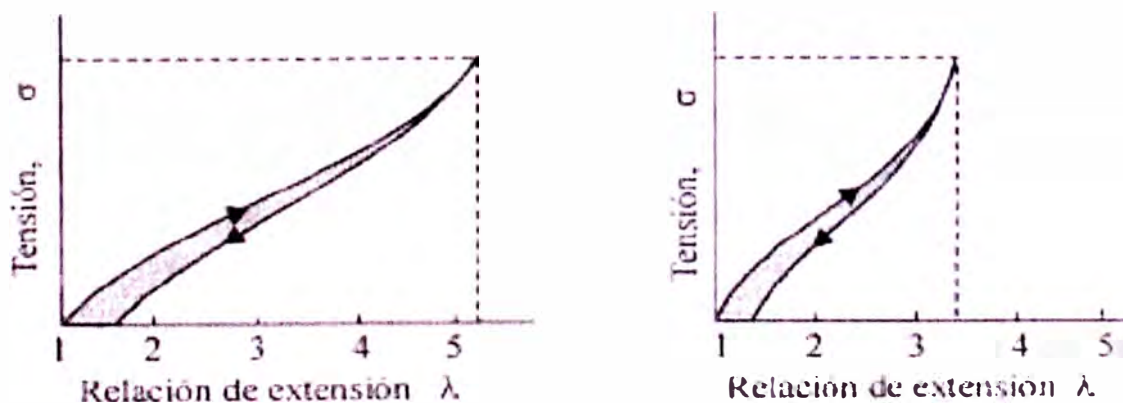
Un ejemplo de caucho con muy alta resiliencia es la goma virgen, el Caucho Natural NR, y por el contrario el caucho con más baja resiliencia es el caucho butílico Butyl IIR, que le proporciona una elevada capacidad de amortiguación de impactos o vibraciones no sostenidas.

El caucho natural, como se observa en la figura presenta excelentes condiciones de resiliencia en comparación con otros cauchos.

Esta situación, sin embargo, no se presenta a muy bajas temperaturas, ya que pierde gran parte de su elasticidad.

### Histéresis, resiliencia y factor de pérdida

Son tres efectos de la pequeña dependencia temporal (visco-) del comportamiento mecánico. En ciclos de carga-descarga aparece una cierta histéresis.

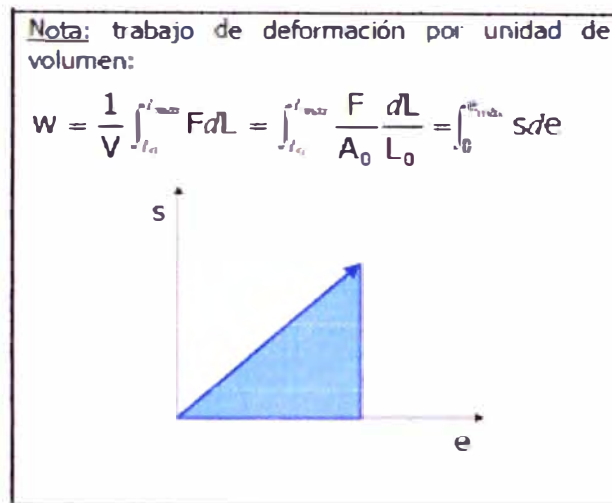


*Izq.: NR poco reticulado sin cargas; der.: NR muy reticulado con cargas.*

**Fig.2.57: En ciclos de carga de tensión-descarga aparece una cierta histéresis: Gráficos tensión –deformación del NR.**

Resiliencia = trabajo recuperado descarga / trabajo aportado en carga.

Es decir, la relación de áreas en el gráfico  $\sigma$ - $\epsilon$ .



**Fig.2.58: áreas en el gráfico  $\sigma$ - $\epsilon$ : Trabajo de deformación por unidad de volumen.**

La resiliencia decrece al aumentar el grado de reticulación.

**Mediciones de la resiliencia del caucho con Ensayo Normalizado: ASTM D 1054, ASTM D 2632, ASTM D 945, ASTM D 623**

Los ensayos normalizados para medida de la resiliencia son:

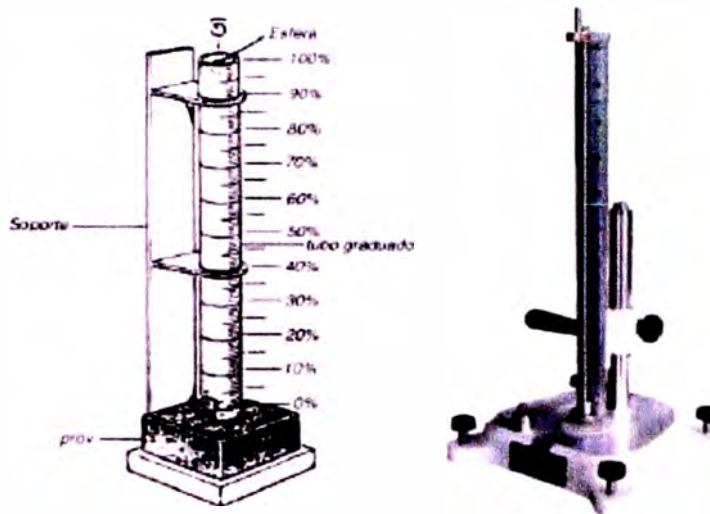
- ASTM D 1054: rebote de un péndulo.
- ASTM D 2632: rebote de un peso en caída vertical.



**Features**

- Meets ASTM D1054, DIN 53512, ISO 4862 Standards
- Digital LCD Read out
- Automatic Release Device
- Adjustable Anvil for Various Specimens Thicknesses
- Average Option For Last three Tests According to Standards
- Pendulum Designed Based on Center of Percussion
- Easy Operation & Maintenance
- Very Low Cost

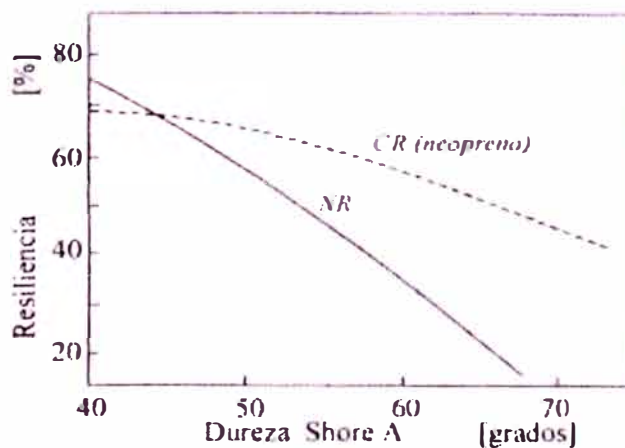
**Fig.2.59: Máquina para ensayo de resiliencia del caucho por rebote de un péndulo.**



**Fig.2.60: aparato para ensayo de resiliencia del caucho rebote de un peso en caída libre.**

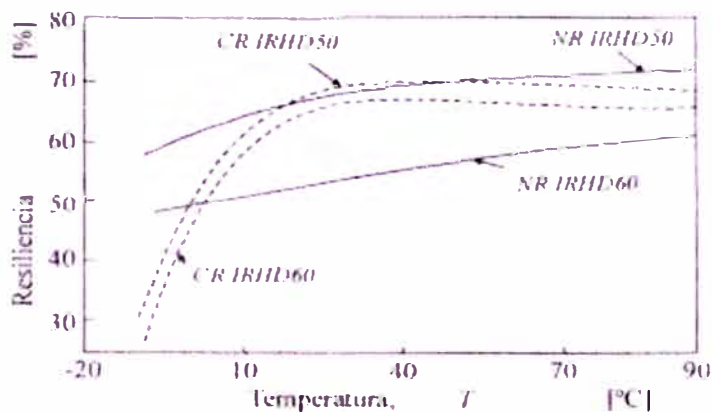
- ASTM D 945: amortiguación de vibraciones de un peso sobre una muestra.
- ASTM D 623: vibraciones forzadas en compresión.

La resiliencia depende del grado de reticulación y de la cuantía de cargas  
 Los dos efectos anteriores influyen también en la rigidez. Es habitual emplear curvas rigidez-resiliencia:



**Fig.2.61: Resiliencia como una función de la Dureza**

Temperatura: rápida reducción de la resiliencia al bajar T cerca de  $T_g$  ( $T_{g,\infty}$ ); a T elevada apenas dependencia o incluso puede haber ligera reducción con la temperatura.



**Fig.2.62: Resiliencia como una función de la Temperatura para diferentes tipos de compuestos de NR y CR.**

**Dureza: resistencia a la indentación (penetración de una punta rígida), ensayos Shore e IRHD**

Es la propiedad más ampliamente ensayada y está definida como la resistencia a la indentación (penetración de una punta rígida), bajo condiciones específicas. Hay dos ensayos de aceptación universal: Dureza Shore y Dureza IRHD (Grados internacionales)

**Dureza Shore**

Diferentes durómetros cubren un amplio rango de durezas en los compuestos de caucho. Esto da resultados en escalas designadas 000, 00, 0, A, B, C y D en orden de dureza creciente. La Dureza Shore A es la más difundida y la escala D se usa para compuestos muy duros, ebonitas y plásticos.

Los durómetros fueron diseñados para ser manuales y portables y cuentan con un indentador de cono truncado de medidas definidas. En el uso del durómetro, se presiona firmemente el aparato contra una probeta plana de modo de forzar al indentador a introducirse en el material.

Un resorte calibrado de acero resiste la fuerza ejercida sobre el indentador por el compuesto de caucho. La deflexión del indentador se observa en un dial, sobre una escala arbitraria de 0 a 100.

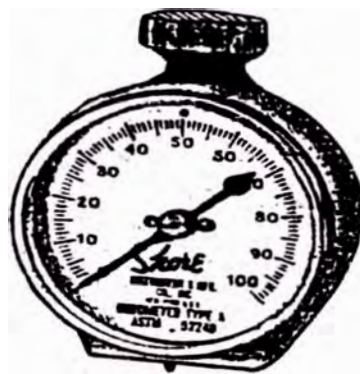
El durómetro es simple y portable, es una herramienta simple y efectiva de control básico de la calidad. Pero el resultado va a depender del modo en que el operador aplique el durómetro a la pieza. El cono se puede dañar por lo que se realiza la verificación dimensional y de posición cuando se calibra el resorte.

Se puede adaptar un pie, pero pierde portabilidad y no sirve para todas las piezas. Las dimensiones de las mismas deben permitir realizar las mediciones a 10 mm de los bordes y el espesor mínimo es de 6 mm pudiendo apilarse hasta alcanzar ese valor.

### **Dureza IRHD**

Usa pesas definidas en vez de resortes sobre el indentador, que en este caso es esférico. Su escala fue elegida para correlacionarse con los valores de la escala Shore y esta correlación es válida para materiales altamente elásticos.

Las probetas pueden tener hasta 4 mm de espesor, pero es preferible usar de 8 a 10 mm. Si los valores no se toman a 10 mm del borde se informan como aparentes. Se pueden usar cargas más reducidas e indentadores de menor diámetro.



**Fig.2.63: Durómetro portátil y manual.**

#### **a. Mediciones de la dureza de elastómeros con Ensayo Normalizado ISO-868 y (ISO-48; ASTM D 1415):**

- Shore A (ISO-868): penetración inicial y/o remanente de punzón.
- Grados internacionales de dureza IRHD (ISO-48; ASTM D 1415): penetración inicial y final de una bola.

#### **b. Resistencia a la abrasión en impacto y en rozamiento del caucho natural y gomas en general.**

Las gomas tienen en general buena resistencia a la abrasión en impacto y en rozamiento.

#### **c. Desgaste (abrasión) por fricción del caucho natural.**

La fricción y el desgaste de un compuesto de caucho natural son propiedades que se suelen interrelacionar; en efecto, el desgaste (o abrasión) que

se produce cuando la pieza de goma fricciona contra una superficie (lisa/rugosa/abrasiva) provoca el desprendimiento de pequeñas, casi microscópicas partículas del compuesto.

La abrasión producida por fricción es quizás la propiedad del caucho natural más compleja, debido a su dependencia con una gran cantidad de variables (carga, velocidad, tipo de superficie, propiedades mecánicas y de rotura del compuesto, histéresis, resistencia a la oxidación, a la reversión y grado de vulcanización obtenido). Resulta difícil formular un compuesto "universal" que responda a todas estas exigencias; hecho agravado aún más si se tiene en cuenta las dificultades que existen para evaluar la resistencia a desgaste en el laboratorio ya que no existe ningún abrasímetro que permita simular correctamente las condiciones reales del servicio futuro del compuesto.

Cuando un cuerpo apoyado en una superficie es movido, hay una fuerza  $F$  que se opone a este movimiento que es proporcional a la fuerza normal  $N$  que tiende a mantener "pegados" el cuerpo y la superficie. El coeficiente de fricción  $\mu$  (coeficiente de proporcionalidad); cuanto mayor es, mayor será la fuerza  $F$  que tiende a "frenar" por fricción al cuerpo.

Idealmente,  $\mu$  es independiente del área o superficie de contacto y de la velocidad con que se mueve el cuerpo. Esta afirmación no es válida para el caso de la goma, porque su coeficiente de fricción es en realidad una constante "variable" que depende de muchos factores.

En primer lugar, el área de contacto entre las dos superficies cambia constantemente debido a la deformación elástica de la goma. Por otro lado, el coeficiente de fricción depende de la velocidad relativa de ambas superficies. Otro factor que indica sobre el fenómeno es la fuerza adhesiva, que tiende a "pegar" la goma sobre la superficie donde fricciona; esta fuerza adhesiva es contraria al resbalamiento puro que se da, por ejemplo, cuando la superficie está mojada o húmeda.

Los mecanismos del desgaste de la goma, cuando ésta fricciona sobre una superficie son verdaderamente muy complejos, pero principalmente comprenden mecanismo de corte o desprendimiento de partículas y fatiga del material:

a) Desgaste abrasivo, causado por las "asperezas" de la superficie. Aquí el desprendimiento de partículas se debe al desgarramiento de las mismas, siendo por lo tanto muy importante las propiedad de rotura del compuesto.

- b) Desgaste por fatiga, donde las partículas se desprenden por esfuerzos dinámicos y reversión causada por la alta temperatura que genera la fricción. Aquí intervienen propiedades como resistencia a la reversión, a la oxidación, generación de calor y por supuesto, resistencia a la fatiga.
- c) Desgaste por adhesión, en donde se transfieren partículas de goma a la superficie debido a las fuerzas de adhesión que existen entre ambas superficies. Aquí interviene la fase plástica que pueda tener el compuesto vulcanizado.

El mecanismo de desgaste es muy distinto según sean las condiciones del mismo. El caucho natural, que tiene superior resistencia a la rotura, da compuestos de excelente resistencia al desgaste cuando éste responde al mecanismo de desprendimiento de partículas por desgarres localizados. Cuando el mecanismo de desgaste incluye fatiga, su resistencia al desgaste es superada por otros cauchos (SBP v por ejemplo) debido a su inferior resistencia a la reversión.

En una formulación de caucho natural, el negro de humo es el ingrediente clave en la resistencia al desgaste. En general ésta aumenta cuanto mayor es la cantidad de negro de humo o cuanto más fina sea la partícula, hasta un cierto límite, ya que con un exceso de negro de humo se tiene una carga de rotura inferior. En la siguiente tabla se puede observar la resistencia al desgaste relativa al uso de varios negros de humo y asignando al HAF el valor 100:

**Tabla 2.23: Índice de Resistencia al Desgaste**

NEGRO DE HUMO	INDICE DE RESISTENCIA AL DESGASTE	AREA ESPECIFICA m <sup>2</sup> /g.
MT	21	8
FT	38	17
SRF	46	25
FEF	75	45
HAF	100	80
ISAF	116	115
SAF	125	140

Este índice puede variar según la severidad del desgaste, definida por la velocidad de las superficies que friccionan o por la carga sobre la goma. Trabajando con severidad "normal", se tendrá mayor resistencia al desgaste cuantas más

pequeñas sean las partículas de negro de humo. Pero trabajando a alta severidad, es más eficiente formular con negros de alta estructura y partícula no tan fina para evitar una excesiva generación de calor en el compuesto.

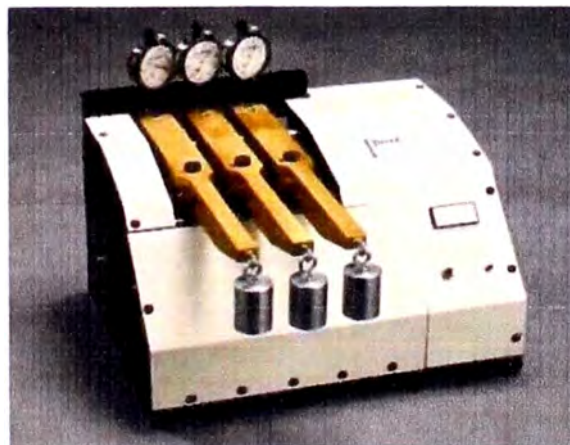
El caucho natural se combina con caucho polibutadieno para mejorar la resistencia al desgaste en superficies lisas. La evaluación de la resistencia al desgaste en el laboratorio resulta imprecisa, poco representativa de la realidad y muy dependiente del tipo de abrasímetro usado.

Los abrasímetros más conocidos y utilizados son los siguientes:

Abrasímetros donde el material abrasivo es del tipo esmeril. Otro abrasímetro es el Pico que desgasta la goma por la acción de dos cuchillas de acero especial.

#### **Mediciones de abrasión de elastómeros con Ensayo Normalizado: ASTM D 1630, D 2228, y D 5963**

Los ensayos ASTM D 1630, D 2228, y D 5963 son comparativos. Los resultados no permiten hacer predicciones.



**Fig 2.64 Máquina para ensayo ASTM D 1630 para 3 muestras. Emplea 3 sondas de espesor, y papel abrasivo (No. 1-1/2 garnet paper).**

#### **Deterioro del caucho natural: Fatiga del caucho natural, Resistencia a la fatiga Fatiga del caucho natural**

Es cualquier cambio en las propiedades de un compuesto cuando es sometido a la acción prolongada de esfuerzos mecánicos intermitentes, especialmente de flexión, provocando en el compuesto la iniciación y propagación de grietas que causan la rotura catastrófica de la pieza de goma (cintas transportadoras, correas de transmisión, neumáticos, etc.).

Por ello hay dos formas fundamentales de manifestaciones de fatiga por



agrietamiento:

- Aparición de grietas
- Crecimiento de grietas

Ambas manifestaciones responden a mecanismos y causas diferentes: por ejemplo el caucho natural desarrolla rápidamente grietas ante esfuerzos cíclicos de flexión pero es relativamente resistente al crecimiento de esas grietas o a la propagación de cortes efectuados de antemano. Hay sintéticos como el SBR por ejemplo, que muestran un comportamiento justamente opuesto en este sentido. Además, la aparición del agrietamiento es favorecido por el envejecimiento del compuesto, mientras que el crecimiento de grietas no depende tanto de la degradación oxidativa, sino de las características viscoelásticas del compuesto. Además del sistema de elastómeros que integran la formulación casi todos los ingredientes tienen una mayor o menor influencia sobre el agrietamiento.

El proceso de FATIGA del caucho natural, ante esfuerzos cíclicos o dinámicos está emparentado con propiedades de rotura y desgarre en lo que respecta al crecimiento de cortes iniciales en la goma, pero se trata de un fenómeno que está influenciado por fenómenos de oxidación y resistencia a la temperatura.

Si no existen cortes iniciales, las fallas por fatiga se pueden originar en:

- a) alguna burbuja interna,
- b) material extraño,
- c) pequeñas grietas,
- d) mala dispersión de mezclado,
- e) zonas microscópicas vecinas de subcura y sobre cura.

Es decir, en cualquier tipo de discontinuidad que produzca una concentración de tensiones en algún punto.

Fatiga por flexión y por extensión

**Medición de Fatiga dinámica en flexión con Ensayo normalizado: ASTM D 430, ASTM D 1052, ASTM D 813, ASTM D 4482, ASTM D 3629.**

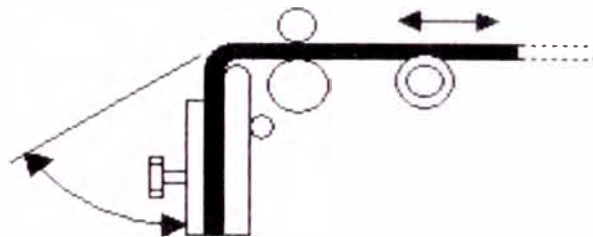
Para la Fatiga en flexión, los ensayos normalizados son:

- ASTM D 430: fatiga dinámica, que se realiza en el flexómetro de De Matia.



**Fig. 2.65 Flexómetro de Matia**

- ASTM D 1052: fatiga dinámica, que se mide también en el flexómetro de Ross.



**Fig. 2.66 Flexómetro de Ross**

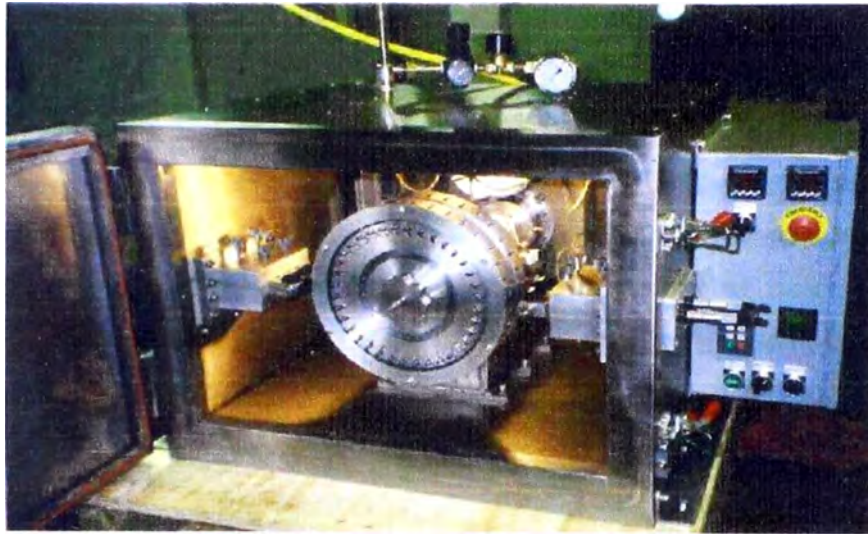
- ASTM D 813: crecimiento de grietas, que se mide en el Flexómetro De Matia

Fatiga en tracción: carga y descarga:

- ASTM D 4482: fatiga dinámica
- Crecimiento de grietas:

Puede emplearse Ley de Paris para crecimiento de grietas en elastómeros sin cristalización inducida por deformación.

ASTM D 3629: crecimiento de grietas, en tensión y bajo la acción de golpeteo en el material (lámina fisurada gira adherida a un cilindro chocando contra barras) en ambiente controlado.



**Fig. 2.67: Máquina para ensayo ASTM D 3629**

ASTM D 1052: doblado reiterado de la lámina por la línea de corte

### **DEGRADACIÓN DEL CAUCHO NATURAL (ENVEJECIMIENTO)**

El látex que mana del árbol es una suspensión acuosa del polímero que contiene largas- cadenas moleculares. A pesar de contener antioxidantes naturales, el látex y posteriormente el coágulo sufre un proceso de oxidación que se traduce en un acortamiento de las cadenas del polímero.

El caucho crudo es almacenado después del proceso de fabricación por semanas o meses enteros. En ese período sufre el llamado endurecimiento durante el almacenamiento, que se traduce en un aumento de viscosidad; la velocidad de endurecimiento depende entre otros factores, de la humedad ambiente (a menor humedad relativa, se endurece más rápido). Este fenómeno se debe a un proceso de entre cruzamiento entra las moléculas, llamado gelificación. Cuando este caucho debe ser usado, se le deberá pre-masticar para tener niveles de viscosidad adecuados al proceso de mezclado posterior.

En la masticación podemos definir una eficiencia de masticación como el % de reducción de la viscosidad con respecto al valor inicial; esta eficiencia depende de la temperatura con la que se realiza la masticación:

Se sabe que la masticación del caucho natural se realiza más eficientemente a temperaturas relativamente bajas o altas que el resultado obtenido a 100 °C por ejemplo, a temperaturas bajas tenemos la masticación fría, donde el caucho reduce su viscosidad por acción mecánica. Si aumentamos la temperatura en esa zona de

la curva, por ejemplo, de 60 a 70°C, el caucho se ablanda y se pierde eficiencia por falta de la fricción necesaria. Esta situación es crítica a 100°C.

Si se sigue aumentando la temperatura, comienza un proceso de rotura de cadenas, no ya mecánicamente, sino por oxidación. Estos fenómenos revisten un carácter importante cuando, antes del uso, los artículos permanecen almacenados largo tiempo. El envejecimiento de vulcanizados de caucho natural implica una paulatina reducción en la carga de rotura, la elongación de rotura, la resistencia al desgarre y a la abrasión. Además, en términos generales, el caucho natural se reblandece durante el envejecimiento es decir, que disminuyen la dureza y el módulo de sus compuestos.

A temperaturas altas se observa frecuentemente el siguiente comportamiento: al principio del envejecimiento tiene lugar un proceso de ablandamiento que se manifiesta en una disminución de la dureza; sin embargo, el módulo 300% puede permanecer constante e incluso aumentar. En esta fase, las propiedades de rotura disminuyen hasta el punto en que el artículo acaba por resultar técnicamente inutilizable.

Si se continúa el proceso de envejecimiento, llega un momento en que desaparecen totalmente las propiedades elásticas que todavía quedaban y el caucho así envejecido se comporta como si fuera un termoplástico: duro y quebradizo en frío y blando en caliente. Esto significa que la dureza (medida a temperatura ambiente) aumenta de nuevo después de haber pasado por un mínimo.

La reversión de los vulcanizados de caucho natural es una destrucción de puentes de vulcanización debido a una sobrecura (aumento del tiempo o temperatura de vulcanización). Los síntomas son parecidos a los provocados por la oxidación: Disminución de las propiedades de rotura y del módulo. Se pueden minimizar mediante la creación de puentes de vulcanización más resistentes al calor a través del uso de sistemas de vulcanización especiales (sistemas EV).

### **Hinchamiento del caucho natural en líquidos**

El caucho natural puede absorber líquidos hasta un importante grado; esta absorción ocasiona un incremento de volumen del caucho o compuesto (de ahí el término hinchamiento), a consecuencia del cual se produce un deterioro de sus propiedades físicas.

El caucho crudo es completamente soluble en ciertos líquidos, pero los

vulcanizados son virtualmente insolubles en los mismos. El hinchamiento del caucho natural es un proceso de difusión pues las moléculas del líquido difunden en el interior de la goma y son absorbidos por ésta. La cantidad de líquido que difunde (hasta que alcanza un equilibrio y no difunde más) depende del grado de entrecruzamiento que liga a las moléculas del caucho. Se entiende por entrecruzamiento no sólo a los puentes de vulcanización sino también a los enlaces carga-caucho.

Estos puentes evitan que toda la molécula sea embebida por el líquido.

Cuanto más vulcanizado esté el caucho y/o cuanto más carga tenga, menor será el hinchamiento.

### Transición vítrea y punto de fragilidad

Ensayo normalizado ASTM D 1053:

Ensayo a torsión de una barra en la que se observa variación de G (módulo elástico transversal) a temperaturas decrecientes. Obtención de un valor de la temperatura de transición vítrea del caucho reticulado  $T_{g,\infty}$  ( $>T_{g,0}$ ).

Ensayo normalizado ASTM D 2137, D 746:

Punto de fragilidad (temperatura por debajo de la cual el material se fractura en ciertas condiciones de sollicitación).

**Tabla 2.24**

TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA DE DISTINTOS TIPOS DE CAUCHOS

Tipo de caucho		$T_{g,0}$ °C
Natural	NR	-70
Polibutadieno (cis)	BR (a)	-105 / -85
Estireno - butadieno	SBR (b)	-80 / -55
Policloropreno (neopreno)	CR	-50
Nitrilo	NBR	-20
Polisobutileno - isopreno (butílico)	IR (c)	-79 / -65
Etileno-propileno	EPM (d)	-60 / -31

(a) dependiendo de la tacticidad

(b) según composición y estructura (al azar o a bloques)

(c) según contenido de isopreno

(d) según relación E/P (de 16/84 a 56/44)

## 2.5. Usos del caucho.

En la industria del caucho se utilizan básicamente dos tipos de caucho: el natural y el sintético. Este último, obtenido a través de diferentes polímeros, sirve

para la fabricación de una gran variedad de productos. El caucho natural se produce principalmente en el sudeste asiático, mientras que el sintético procede en su mayoría de países industrializados como Estados Unidos, Japón, Europa occidental y Europa oriental, China, India, Corea. Brasil es el único país en desarrollo que posee una industria importante de caucho sintético.

En los últimos tiempos, la industria del caucho ha experimentado un proceso de mundialización. Al tratarse de una industria que utiliza un gran volumen de mano de obra, se encuentra en expansión en los países en desarrollo.

#### **2.5.1. Usos del caucho natural**

Se usa comúnmente en: Neumáticos, soportes elásticos, burletes, acoplamientos, soportes de puentes y para la construcción, calzado, mangueras, correas transportadoras, productos moldeados, revestimientos, rodillos, guantes, preservativos, dispositivos sanitarios, pegamentos, tejidos de fondo para alfombras, hilos, espuma.

Los cauchos naturales más usados industrialmente son:

##### **a. Caucho crepe pálido (tipo palé crepé)**

En un proceso más elaborado, se prensan varias láminas de este caucho, que se comercializan como "SUELA CREPE" en la industria del calzado.

##### **b. Caucho natural pelletizado**

El caucho en forma de pellets, de tamaño algo mayor que 1mm., mantenidos "libres" (es decir, no aglomerados) por medio de un agente especial, se usan en adhesivos en solución aunque en compuestos puede facilitar el mezclado.

##### **c. Caucho natural extendido al aceite (OENR)**

Estos cauchos comúnmente contienen entre 20 y 30% de un aceite aromático o naftánico. El EONR es superior a los cauchos sintéticos en cuanto a la propiedad de la resistencia al resbalamiento en superficies húmedas o heladas. Prácticamente su uso queda restringido a la industria del neumático, donde se le suele usar en la fabricación de cubiertas para invierno (winter tires).

##### **d. Caucho natural de la forma trans ( balata o gutapercha)**

Se utiliza para cobertura de pelotas de golf.

#### **2.5.2. Usos del caucho sintético.**

Los cauchos sintéticos más usados industrialmente son:

##### **a. Polisopreno (IR):**

Tiene propiedades y usos similares al Caucho natural.

**b. Estireno-butadieno (SBR):**

Sustituyó al caucho natural durante la Segunda Guerra Mundial; baja resistencia al aceite y disolventes Neumáticos (75 %), correas transportadoras, esponjas, productos moldeados, calzado, mangueras, recubrimientos de rodillos, pegamentos, productos impermeables, forros de alfombra de látex, productos de espuma. Aplicaciones actuales: Fabricación de cinturones, mangueras para maquinarias y motores, juntas, y pedales de freno y embrague. En el hogar se encuentra en juguetes, masillas, esponjas, y baldosas. Fabricación de productos sanitarios, guantes quirúrgicos e incluso goma de mascar. - Cubiertas de neumáticos de tamaño pequeño y medio - Sector calzado - Correas transportadoras y de transmisión - Artículos moldeados – Perfiles.

**c. Polibutadieno (BR):**

Tiene baja resistencia al aceite y disolventes; no resistente a la intemperie, alta resiliencia, resistencia a la abrasión y flexibilidad a baja temperatura. Se emplea comúnmente en: Neumáticos, calzado, correas transportadoras, correas de transmisión, pelotas de juguete.

**d. Butilo (IIR):**

Tiene baja permeabilidad al gas; resistente a calor, ácidos y líquidos polares; no resistente al aceite y disolventes; resistencia moderada a la intemperie. Se emplea comúnmente en: Interiores de tubos, cámaras de neumáticos, calafateo y selladores, aislamiento de cables, aisladores vibracionales, revestimiento protector de estanques y membranas para tejados, correas transportadoras y mangueras para alta temperatura. Aplicaciones del IIR halogenado (compatible con NR y otros) son: forro interior de neumáticos sin cámara, Aislamiento de cables de alta tensión, Tapones en contacto con fármacos o alimentos, Tuberías en contacto con aceites y disolventes polares.

**e. Caucho de Etilenpropileno/Etilenpropilendieno:**

Es Flexible a baja temperatura; resistente a la intemperie y al calor pero no al aceite, o a los disolventes; excelentes propiedades eléctricas. Se usa comúnmente en: Recubrimientos de cables; desfibradores y burletes extruidos; productos moldeados; juntas aislantes; recubrimientos para silos, tejados, estanques, zanjas y vertederos controlados.

**f. Caucho de Policloropreno (CR) (neopreno):**

Es resistente al aceite, llamas, calor e intemperie. Se usa comúnmente en: Recubrimientos de cables, mangueras oleohidráulicas de alta presión, correas transportadoras, calzado, ropa impermeable, tejidos recubiertos y productos inflables, extruidos, pegamentos, soportes de puente y raíl, revestimientos, juntas de esponja, productos de espuma de látex.

Se emplea en tuberías de conducción de petróleo, mangueras de sistemas hidráulicos de maquinaria pesada, y como aislante para cables y maquinaria.

### H430 VERY HIGH PRESSURE HOSE

- Used for very high pressure hydraulic lines subjected to pressure surges and flexing.
- Typical applications include construction, mining, farming, and high performance industrial equipment.
- Meets or exceeds SAE 100R12 specifications.
- Temperature range: -40 F. to +250 F. (-40 C. to +121 C.).
- For use with H430 U-Series hose ends on page H10.
- Hose must be skived when using E-Series hose ends. do not skive for U-Series hose ends.



PART NO.	CROSS REFERENCE	HOSE I.D.	HOSE O.D.	MAXIMUM WORKING PRESSURE	MINIMUM BURST PRESSURE	MINIMUM BEND RADII	QTY. FEET
92660	H43008	1/2	15/16	4,000 psi	16,000 psi	7"	50
92661	H43012	3/4	1-7/32	4,000 psi	16,000 psi	9-1/2"	50
92662	H43016	1"	1-33/64	4,000 psi	16,000 psi	12"	50
92663	H43020	1-1/4	1-7/8	3,000 psi	12,000 psi	16-1/2"	50

#### CONSTRUCTION:

Inner tube: Neoprene

Reinforcement: 4 spiral steel plies

Cover: Gray oil resistant synthetic rubber

**Fig. 2.68: Manguera hidráulica de muy alta presión de neopreno.**

### g. Caucho de acrilonitrilo butadieno, Nitrilo (NBR)

En general es resistente al aceite, disolventes no polares y aceite vegetal, pero se hincha con disolventes polares como las cetonas. Se emplea en recubrimientos y juntas para mangueras resistentes a combustibles, camisas de rodillos, correas transportadoras, suelas de zapatos, guantes, pegamentos, equipos de perforación para pozos petrolíferos, mangueras oleohidráulicas de alta presión.

### H145 HIGH PRESSURE HYDRAULIC HOSE

- For use in high pressure lines on off-road construction equipment, farm equipment, and other high pressure applications where a small bend radius is needed.
- MSHA accepted.
- Meets or exceeds SAE 100R17.
- Reinforcement: 2 steel braids (For 3/4 I.D. hose).
- Temperature range: -40 F. to +212 F. (-40 C. to +100 C.).
- For use with U-Series hose ends on page H7 through H9.



PART NO.	CROSS REFERENCE	HOSE I.D.	HOSE O.D.	MAXIMUM WORKING PRESSURE	MINIMUM BURST PRESSURE	MINIMUM BEND RADII	QTY. FEET
93432	H14510	5/8	31/32	3,045 psi	12,180 psi	4"	50
93432-4	H14510	5/8	31/32	3,045 psi	12,180 psi	4"	250
93433	H14512	3/4	1-5/32	3,045 psi	12,180 psi	4-3/4"	50
93433-4	H14512	3/4	1-5/32	3,045 psi	12,180 psi	4-3/4"	250
93434	H14516	1"	1-15/32	3,045 psi	12,180 psi	6"	50

#### CONSTRUCTION:

Inner tube: Nitrile

Reinforcement: 2 steel braids

Cover: Neoprene



**Fig. 2.69: Manguera hidráulica de muy alta presión de nitrilo.**

**Silicona (MQ):** Es estable a temperaturas altas y bajas; resistente al aceite, disolventes e intemperie; fisiológica y químicamente inerte. Se emplea comúnmente en: aislamiento de cables, burletes, pegamentos, juntas, productos moldeados y extruidos, mascarillas de gas y respiradores, tubos para alimentación y sanitarios, implantes quirúrgicos.

**Polisulfuros (OT):** Es resistente al aceite, disolventes, bajas temperaturas e intemperie; baja permeabilidad al gas, Camisas de rodillos, revestimientos de mangueras, juntas, productos moldeados, taponadores, diafragmas para gasómetros, selladores de vidrio, aglomerante sólido de combustible para cohetes.

**Fluoroelastómeros (FKM - Viton, Fluorel):** Tiene las siguientes aplicaciones: mangueras de productos corrosivos, accesorios en industria aeroespacial.

Uno de los cauchos fluorados más popularmente utilizados es el Viton. Este elastómero consiste esencialmente de cuatro diferentes "familias" de polímeros:

**Tabla 2.25**

FAMILIA DE VITON	TIPO	APLICACIONES
A	A,AL	SELLOS DE PROPOSITOS GENERALES: INDUSTRIA AUTOMOTRIZ, COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES DE AVIACION
B	B,BL,GBL-S	PLANTAS QUIMICAS, SELLOS Y GUARNICIONES
F	F,GF-S	INDUSTRIA AUTOMOTRIZ. CONTACTO CON SOLUCIONES ACIDAS INORGANICAS, Y VAPOR
VITON EXTREME	TBR-S,ETP-S	LUBRICANTES DE ALTO PH. GRASAS. EXPLOTACION PETROLERA. SELLOS ESPECIALMENTE EXIGIDOS

### 2.5.3. Formas industriales comunes de fabricaciones con caucho.

Las formas más comunes de fabricación con cauchos naturales y sintéticos son:

- ✓ Fabricación de tubos para agua, gas y aire a grandes presiones.
- ✓ Fabricación de correas de Transmisión de potencia.
- ✓ Fabricación de esponjas de caucho
- ✓ Fabricación de sondas y tubos de cirugía
- ✓ Fabricación de tejidos impermeables
- ✓ Fabricación de componentes de aparatos electrodomésticos
- ✓ Aplicaciones en la medicina

#### 2.5.4. Usos frecuentes en automóviles y maquinaria.

- ✓ Correas de transmisión:
- ✓ Mangueras (para hacer circular aire, calefacción, agua del vehículo):
- ✓ Interiores revestidos en caucho, pedaleras y volantes:
- ✓ Pisos antideslizantes:
- ✓ Neumáticos ,Cámaras:



- ✓ En maquinarias movidas por cadenas, encontramos caucho en las bandas de zapatas de tracción tipo oruga. En maquinaria agrícola encontramos Neumáticos agrícolas
- ✓ Amortiguadores de caucho/metal y soportes de Pie de máquina.

#### 2.5.5. Uso del caucho como revestimiento interior (blindaje) del casco o tambor de molinos giratorios

En el interior del tambor y tapas de los molinos de cualquier tipo, se emplea un revestimiento formado por planchas de acero o caucho, en las cuales hacen contacto la pulpa y los elementos molturadores. Estos forros deben absorber el desgaste y preservar la estructura cilíndrica y las tapas. Para ello estas máquinas contaban originalmente con forros de acero y actualmente se está introduciendo los forros de caucho natural con excelentes resultados.

El uso de forros de caucho natural formulado y vulcanizado en los molinos empezó por los años de la década 1960, siempre los forros de caucho consistieron en planchas (llamadas Shell plate en el cilindro y head plate en las tapas) y barras elevadoras (lifter bar para los cilindros y head lifter para las tapas).

#### 2.5.6 Uso del caucho en las plantas de beneficio de minerales.

Uso de fajas transportadoras, revestimiento de chutes, sistemas de transporte hidráulico de lodos, forros de hidrociclones, planchas antidesgaste,

atimpecto, bombas centrifugas para lodos, revestimiento de celdas de flotación, elementos de agitación para celdas (hélices, difusores, estatores), mallas para zarandas vibratorias, clasificadores rotativos y todos los procesos donde hay desgaste

Los Compuestos base, de uso general para la fabricación del blindaje de caucho, de varios elastómeros y combinaciones, modificados por la adición de plastificantes y cargas para obtener la dureza deseada Shore "A", según normas ASTM, son los siguientes:

<b>Natural Rubber, Normal Sulfur</b>						
<b>ASTM D735 TYPE</b>		<b>R425</b>	<b>R525</b>	<b>R625</b>	<b>R720</b>	<b>R820</b>
<b>Base .</b>						
	Smoked Sheet	100	100	100	100	100
	REOGEN	2	2	2	2	2
	Stearic Acide	2	2	2	2	2
	Zinc Oxide	5	5	5	5	5
	AGERITE RESIN D	1	1	1	1	1
	AGERITE WHITE	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	Sulfur	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
	Altax	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
	METHYL TUADS	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
<b>Variables</b>						
	PLASTOGEN	15	10	5	5	-
	P-33	25	45	50	70	100
	MPC-Black	-	-	20	40	40
<b>Total</b>		<b>154.40</b>	<b>169.40</b>	<b>189.40</b>	<b>229.40</b>	<b>254.40</b>
<b>Sp. Grav. (calc)</b>		<b>1.03</b>	<b>1.08</b>	<b>1.12</b>	<b>1.24</b>	<b>1.30</b>
<b>(press Cures: 10 Min, at 307 °F)</b>						
	Shore A Hardness= 5	40	50	60	70	80
	Tensile Strength, psi	2950	2800	2600	2290	2250
	Stress at 300%, psi	680	620	510	360	2250
	% Elongation	410	660	1310	1850	300

**Natural Rubber-Reclaim, Normal Sulfur**

ASTM D735 TYPE	R410	R515	R615	R715	R810	R910
<b>Base .</b>						
Smoked Sheet	50	50	50	50	50	50
Reclaim (Whole Tire)	94	94	94	94	94	94
REOGEN	5	5	5	5	5	5
Stearic Acide	1	1	1	1	1	1
Zinc Oxide	3	3	3	3	3	3
AGERITE POWDER	1	1	1	1	1	1
Sulfur	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.5
Altax	1	1	1	1	1	1
METHYL ZIMATE	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1
<b>Variables</b>						
PLASTOGEN	10	-	-	-	-	-
P-33	-	20	30	60	100	140
MPC-Black	-	-	15	25	40	70
<b>Total</b>	<b>167.60</b>	<b>177.60</b>	<b>202.60</b>	<b>242.60</b>	<b>297.60</b>	<b>367.60</b>
<b>Sp. Grav. (calc)</b>	<b>1.05</b>	<b>1.13</b>	<b>1.18</b>	<b>1.26</b>	<b>1.33</b>	<b>1.37</b>
(press Cures: 15 Min, at 2902 °F)						
Shore A Hardness= 5	40	50	60	70	80	90
Tensile Strength, psi	1325	1795	1830	1535	1150	1125
Stress at 300%, psi	450	605	770	1075	1100	-
% Elongation	565	590	565	450	355	160

**Natural Rubber, Low Sulfur**

ASTM D735 TYPE	R425	R530	R630	R730	R825
<b>Base .</b>					
Smoked She	100	100	100	100	100
REOGEN	2	2	2	2	2
Stearic Acide	2	2	2	2	2
Zinc Oxide	5	5	5	5	5
AGERITE RES	1	1	1	1	1
AGERITE WH	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Sulfur	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
METHYL TUA	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
TELLOY	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Altax	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
<b>Variables</b>					
PLASTOGEN	10	5	5	3	3
P-33	30	50	20	25	40
MPC-Black	-	-	50	65	75
<b>Total</b>	<b>152.55</b>	<b>167.55</b>	<b>187.55</b>	<b>205.55</b>	<b>230.55</b>
<b>Sp. Grav. (calc)</b>	<b>1.05</b>	<b>1.11</b>	<b>1.16</b>	<b>1.21</b>	<b>1.25</b>
(press Cures: 15 Min, at 307 °F)					
Shore A Harc	40	50	60	70	80
Tensile Strer	2940	3130	3320	3130	2900
Stress at 300	220	300	1060	1620	2060
% Elongatior	770	730	640	560	440

<b>Natural Rubber, Sulfuries (TUADS Cured)</b>						
<b>ASTM D735 TYPE</b>	<b>R425</b>	<b>R525</b>	<b>R625</b>	<b>R720</b>	<b>R820</b>	
<b>Base .</b>						
Smoked She	100	100	100	100	100	
REOGEN	2	2	2	2	2	
Stearic Acide	2	2	2	2	2	
Zinc Oxide	5	5	5	5	5	
AGERITE RES	1	1	1	1	1	
AGERITE WH	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
Altax	1	1	1	1	1	
METHYL TUA	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	
ETHYL TUAD	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	
TELLOY	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
<b>Variables</b>						
PIASTOGEN	10	5	-	-	-	
P-33	40	60	50	70	100	
MPC-Black	-	-	25	40	50	
<b>Total</b>	<b>165.00</b>	<b>180.00</b>	<b>190.00</b>	<b>225.00</b>	<b>265.00</b>	
<b>Sp. Grav. (calc</b>	<b>1.08</b>	<b>1.14</b>	<b>1.17</b>	<b>1.24</b>	<b>1.31</b>	
<b>(press Cures: 15 Min, at 307 °F)</b>						
Shore A Harc	40	50	60	70	80	
Tensile Strer	2670	2600	2600	2360	2000	
Stress at 300	220	400	730	1300	1430	
% Elongatior	700	670	620	540	460	

## **CAPITULO III**

### **3. ASPECTOS TEORICOS DE MOLIENDA DE MINERALES**

#### **3.1. Consideraciones Generales**

Una cierta proporción de los minerales que se extraen de las minas se encuentra en trozos demasiado grandes para ser sometidos a los tratamientos usuales de concentración; por eso deben reducirse previamente a un tamaño uniforme y suficientemente pequeño. Estas operaciones que tienen por objeto triturar, granular o pulverizar las piedras, constituyen lo que genéricamente se denomina Molienda de Minerales, El método que se emplea para moler un mineral es casi siempre independiente del tratamiento de concentración a que se le va a someter después. La molienda tiene su técnica propia sobre la cual influye muy poco la composición de la mena y el contenido o especies minerales que encierra.

Los factores que influyen sobre la molienda son en su mayoría propiedades físicas de los minerales, los que determinan el tipo de molienda, de dispositivos y de organización de la planta que se establezca para reducirlos al grado de finura necesaria. Los factores determinantes del tipo de molienda a emplearse son:

- a) La dureza, y demás condiciones físicas del mineral; friabilidad o pastosidad, cantidad de humedad que encierra, forma de fracturarse, tendencia a pulverizarse o romperse en esquirlas de determinada forma, etc.
- b) Las dimensiones de Los trozos mayores que deben entrar a la molienda.
- c) El tamaño a que debe reducirse todo el material.
- d) El tonelaje que debe molerse pasándolo por máquinas adecuadas, según el tamaño de las partículas.
- e) La ubicación de la planta de molienda con respecto a la mina y los recursos locales de energía, agua, calidad del terreno para la fundación de las máquinas, etc.

La dureza de los distintos materiales y resistencia a la ruptura se aprecia en la siguiente relación tomada de un estudio referente a los efectos de los explosivos sobre las rocas. Si tomamos como unidad de dureza la de la roca caliza se tiene la siguiente escala:

Dolomita, gneiss hornobléndico, sianita augítica, granito, biotítico, esquisto micáseso y anfibelita	1.0
Andesita	1.1
Gneiss granítico, peridotita, pizarra	1.2
Granito, areniscas calcáreas, chert	1.5
Gabo	1.6
Arenisca feldespático y basalto alterado	1.7
Dirita sugítica, gneiss biotítico, cuarcita	1.9
Riolita	2.0
Granito hornobléndic, esquisto hornobléndico y dicrita	2.1
Hasalto	2.3
Diabasa alterada	3.0

La relación entre las dimensiones de los trozos mayores que deben entrar a la molienda y las de los granos a que debe reducirse el material determina el número de operaciones o de etapas que deberá tener la molienda, sabiendo que en cada etapa la reducción en tamaños no debe ser mayor 6 a 1, en ciertos tipos de máquinas grandes y de 4 a 1 ó de 3 a 1, en las comunes.

El tonelaje que debe tratarse por día determina el tamaño o capacidad y el número de máquinas que deberá emplearse en cada etapa de operación de molienda horizontal y de caída vertical que puede disponerse para la distribución y agrupación más conveniente de las diversas máquinas.

### **3.2. Reducción de tamaño.**

La reducción del tamaño comprende la trituración (machacado) (quebrantado), molienda, escamación, emulsificación, pulverización, y dispersión de gases (Ref.Manual del Ingeniero químico de Perry).

Molienda se refiere tanto a la pulverización como a la desintegración .Estas operaciones se diferencian por la naturaleza del material alimentado, por su tamaño y por la reducción que puede alcanzarse .Estas características, entre otras, fijan el diseño de la maquinaria de molienda.

La diferencia entre pulverización y la desintegración se establece por la homogeneidad física del material manejado. La desintegración se refiere a la reducción del tamaño de agregados de partículas blandas débilmente ligadas entre sí y se sobreentiende que no se produce ningún cambio en el tamaño de las partículas fundamentales de la masa (Work ASME, RP-55-675(1932)).

**Fig. 3.1: Diagrama básico de operaciones del procesamiento del mineral de hierro desde el depósito del mineral en bruto hasta la obtención del hierro concentrado, fuente página Web**



Perforación y voladura  
Carguio  
Acarreo

# MINA

Chancado Pmario y Secundano

Stock de mineral Mina

Transporte por faja 15.3 Km

Chancado Terciano

Chancado Pmario y Secundano

Toiva Transferencia

# BENEFICIO

Silos

Molienda Gruesa

Molino de Barras

Molienda Fina

Molino de Bolas

Separación Magnética Primaria

Separación Magnética Secundana

Flotación

Espuma A Cochas

Concentrado

Espesamiento

Bomba

Almacenamiento y Aglación

Sturry

Silica

Bomba

Filtros

Toiva de Concentrado

Mezclador

Disco Peletizador

Bentonita

Stock de Pellets - Planta

Stock Pellets - Puerto

Embarque

SHOUGANG HIERRO PERU S.A.A.  
FLOW AHEET MINA - BENEFICIO

### **3.2.1. Escala de Reducción en una máquina de molienda**

Es la relación que existe entre el tamaño del material molido que sale de ella y el tamaño de los trozos de alimentación. Si una chancadora se alimenta con trozos que tienen dimensiones máximas de 12 pulgadas para molerlos y reducirlos a fragmentos de 2 pulgadas, se dice que la escala de reducción de esta máquina es de 2: 12, o sea un sexto. Usualmente se invierte los términos y se dice que la escala de reducción de dicha máquina es de 6, lo que significa que cada fragmento que entra a molerse es teóricamente dividido en 6 partes.

La escala de reducción es útil para expresar en forma general la capacidad reductora de moler. Tiene principalmente un valor comparativo para apreciar la diferencia entre diversos tipos de aparatos de molienda. Pero en la práctica es difícil establecer esta relación porque no todos los trozos que se alimentan para ser triturados tienen exactamente el mismo tamaño máximo que la máquina pueda recibir. La mayoría de los fragmentos que constituyen la alimentación de un tamaño mucho menor que el tamaño máximo límite. Igualmente, el material molido que sale de una máquina no es de tamaño uniforme, habiendo siempre una fuerte proporción de partículas mucho más pequeñas que el tamaño límite máximo permitido a la máquina moler.

La escala de reducción se considera, en su forma más teórica, como la relación de tamaño entre el trozo más grande que puede entrar a la máquina y el trozo más grande que, según la forma del dispositivo y su ajuste, puede salir entre el material molido. Luego la escala de reducción es muy útil como un dato cualitativo respecto a las máquinas que se usan para moler. En este último aspecto significa la relación entre la abertura por donde debe entrar el material que se alimenta y la abertura por donde la máquina descarga el material molido. En determinados casos se calcula la escala de reducción tomando el promedio de los tamaños del material alimentado y del material molido en una máquina dada. Este sistema se emplea principalmente en casos de molienda fina.

### **3.2.2. Medición y clasificación de las partículas (granos) de minerales reducidas de tamaño.**

Para medir y clasificar las partículas que integran, según sus dimensiones, de un conjunto de granos de distintos tamaños (análisis granulométrico), en los laboratorios y en la industria, se hace valiéndose de cedazos fabricados con

alambres de acero u otros metales, los que se tejen formando una red cuadrangular de agujeros de diversas dimensiones.

Las telas o mallas (cedazos) de alambre tejido más finas que se fabrican tienen agujeros cuadrados cuya longitud de lado es mucho menor que 1 mm. Así el tejido conocido con el nombre de "malla 200" y que sirve de patrón o etalón, o estándar, universalmente aceptado, tiene aberturas cuadradas pequeñísimas, siendo la dimensión del lado del cuadrado de 0,074 de mm o sea 0,0029 de pulgada. Esta malla 200 que se emplea comúnmente en los laboratorios de prueba de todas las plantas metalúrgicas, no es la más fina que puede fabricarse. Partiendo de esta malla-base, malla 200, se construyen cedazos, cuyos agujeros van aumentando en forma progresiva y determinada. Las distintas casas manufactureras de cedazos fabrican series de mallas que a partir de la 200 van aumentando de tamaño formando una progresión creciente cuya razón varía ligeramente según los fabricantes.

La casa V.S. Tyler Company de Cleveland, Ohio, que es una de las firmas más importantes dedicada a la confección de mallas metálicas y aparatos cernidores, ha adoptado como razón de la progresión en una serie estándar de cedazos el valor de  $\sqrt{2}$ . La ventaja de esta razón es que se consigue que la superficie de los agujeros en las mallas sucesivas de la serie sea el doble de la anterior. Si llamamos L la longitud del lado del cuadrado que forme la abertura de un cedazo cualquiera, la superficie total de la abertura será:

$$S = L^2 \quad (3.1)$$

El cedazo siguiente de la serie, adoptando el sistema Tyler, tendrá agujeros cuadrados cuya longitud de lado L' es:

$$L' = \sqrt{2} L \quad (3.2)$$

La superficie de este agujero cuadrado de lado L' es:

$$S' = (L')^2 = 2L^2 \quad (3.3)$$

o sea que la superficie del agujero cuadrado es el doble del correspondiente al miembro anterior de la serie. En esta forma se ha construido una serie escalonada de cedazos, con aberturas crecientes a partir de la malla estándar o malla 200.

A medida que el tamaño de las aberturas es mayor, la tela de alambre tiene que soportar partículas más grandes y de mayor peso, por lo tanto, El calibre de los alambres va aumentando proporcionalmente para hacer la tela más resistente. Los

materiales de estos alambres son aleaciones resistentes, y lo más inoxidable posible.

Fabricadas las telas de las mallas sucesivas de acuerdo con la progresión descrita, y dando a los alambres de cada una el diámetro más conveniente, se ha contado el número de hilos y agujeros que resultan por pulgada para cada malla de la progresión y se ha denominado cada una de ellas de acuerdo con la costumbre sajona de indicar el número de hilos por pulgada. En esta forma la casa Tyler tiene la siguiente serie de mallas cuyas características se indican en la tabla siguiente:

**Tabla 3.1: SERIE CRECIENTE DE MALLAS "TYLER"**

<b>Nombre de la malla Hilos por pulgada</b>	<b>Abertura en milímetros</b>	<b>Abertura en en decimales de pulgada</b>	<b>Diámetro del alambre en Decimales de pulg.</b>
200	0,074	0,0029	0,0021
150	0,104	0,0041	0,0026
100	0,147	0,0058	0,0042
65	0,208	0,0082	0,0072
48	0,295	0,0116	0,0092
35	0,417	0,0164	0,0122
28	0,589	0,0232	0,0125
20	0,833	0,0328	0,0172
14	1,651	0,046	0,025
10	1,681	0,065	0,035
8	2,362	0,093	0,032
6	3,327	0,131	0,036
4	4,699	0,185	0,065
3	6,680	0,263	0,070
	9,423	0,371	0,092
	10,850	0,525	0,105
	13,330	0,742	0,135
	26,670	1,050	0,148

Como se ve en la serie anterior, después de la malla 3 (3 hilos por pulgada lineal) y que, tiene una abertura de casi un cuarto de pulgada por lado, ya no se

puede continuar llamando a los cedazos más grandes por el número de hilos por pulgada. Las casas manufactureras fabrican también mallas intermedias entre los miembros de la serie, cuando se quiere hacer clasificaciones muy minuciosas de los granos.

La serie Tyler se ha adoptado prácticamente en casi todos los laboratorios del mundo. En el Perú se emplea la serie de cedazos Tyler en forma casi universal tanto en operaciones relacionadas con Preparación Mecánica y Metalúrgica como para el estudio del material de afirmado de carreteras, agregados para el concreto, mecánica de los suelos y en las industrias que requieren análisis granulares exactos como cemento, abrasivos, etc.

### **3.2.2.1. Práctica del Análisis Granulométrico**

Los cedazos para hacer el cernido en el laboratorio tienen forma circular y son recipientes de bronce o latón de 6, 8, 10 y 12 pulgadas de diámetro y 2 a 4 de alto. La tela metálica se coloca en el fondo del recipiente. Estos recipientes o zarandas pueden telescopiarse unos dentro de otros, constituyendo lo que se denomina un nido de cedazos. Una colección completa de estos cedazos debe contener una tapa para cubrir el cedazo superior y un depósito igual a cualquiera de los cedazos, pero con fondo de latón, depósito que se coloca debajo del último cedazo para que reciba el material cernido.

Para equipos portátiles y a fin de que no ocupen mucho lugar, se fabrican los cedazos de una serie con diámetros decrecientes a fin de que los recipientes puedan introducirse uno dentro de otro correspondiendo los de menor diámetro a los cedazos de mayor abertura. Así todo un nido de cedazos ocupa un espacio igual al que ocupa un cedazo corriente.

Cuando se hace el cernido o clasificación granular a mano, se toma un peso determinado del material o muestra, uno o dos kilos y se colocan en el cedazo de malla más grande, de acuerdo con el mayor tamaño de los granos que existan en la muestra; debajo del cedazo, se coloca el recipiente de latón y encima la tapa. Tomando con ambas manos el cedazo y el recipiente se zarandea por varios minutos hasta que quede sobre el cedazo solamente el material que no puede pasar con él. Este material se pesa. Los granos que pasaron y que se encuentran en el recipiente se colocan en otro cedazo de malla de tamaño inmediato inferior de la serie y se practica de la misma operación. En la misma forma se procede hasta llegar al cedazo con malla 200, se toma nota cuidadosa de los pasos del material

que ha quedado sobre cada uno de los cedazos así como del material que pasó por la malla 200.

La suma de estos pesos debe dar teóricamente el peso de La muestra primitiva, aunque en la práctica siempre haya una pérdida. Esta pérdida se puede atribuir al material fino y algunos operadores consideran este paso como si encontrara en la malla 200 (que pasó por la malla 200), Otros operadores dividen la pérdida proporcionalmente entre todos los granos. Los pesos del material que queda sobre cada uno de los cedazos deben reducirse a por cientos del total de la muestra.

### 3.2.2.2. Presentación de los Resultados obtenidos de un análisis granular

Los resultados de un análisis granular pueden expresarse en forma tabulada o en forma gráfica.

En la forma tabulada basta hacer un cuadro de 4 columnas indicando: número de la malla; abertura en milímetros; por ciento retenido sobre cada cedazo y por ciento acumulado para cada cedazo:

**Tabla 3.2: Resultados de un análisis granular expresados en forma tabulada**

Malla Nº	Abertura en Milímetros	% del peso de la muestra	
		Parcial	Acumulado
35	0,417	10,8	10,8
48	0,295	12,0	22,8
65	0,208	13,0	35,8
100	0,147	13,6	49,4
150	0,104	10,1	59,5
200	0,074	11,5	71,0
200	0,074	29,0	100,0

En este cuadro el % parcial da la proporción de peso de material que ha quedado retenido en cada uno de los cedazos, Indica igualmente la proporción de material que pasó por la malla 200, material que se llama - 200. El % acumulado representa el total del material que no pasa por un cedazo dado.

### **3.2.2.3. Preparación de las Muestras**

La técnica del muestreo, a fin de que la cantidad tomada para el ensayo granular sea representativa del total, es exactamente igual a la que rige para ensayos químicos. Si se trata de lotes o montones de material acumulado hay que proceder previamente a cuarteos sucesivos. También sí puede lampear de un sitio a otro separando una lampada de cada cinco o diez para constituir una primera muestra luego esta muestra hay que pasarla por muestradores mecánicos para ir la reduciendo en volumen. Hay aparatos cuarteadores manuales para laboratorio que son indispensables en muchos casos. Estos aparatos se llaman en inglés Sample Splitter o Sample Reducer.

Cuando el material que hay que muestrear sale en forma Continua de una tolva o de un aparato de molienda ya sea en polvo o arrastrado por el agua el muestreo es más fácil de hacer y debe emplearse aparatos mecánicos que a intervalos regulares toman una cantidad fija de material para ir constituyendo la muestra. Nada significa hacer un análisis granular cuidadoso si la muestra sobre la cual se actúa no es representativa del lote íntegro del material que se analiza.

### **3.3. Trituración y molienda.**

Antiguamente se trataba de hacer máquinas de gran escala de reducción que pudieran triturar un trozo de mineral reduciéndolo a partículas que fueran la décima o la vigésima parte del tamaño original, en una sola operación. Estas máquinas necesariamente tenían poca capacidad. Luego los procedimientos de molienda se resumían en dos pasos:

- El quebrantamiento o trituración
- La pulverización del material.

Pero en los últimos años ha habido una tendencia de los constructores de máquinas de molienda y de los ingenieros a cargo de estas operaciones, a crear tipos de trituradoras de gran capacidad, para pasar fuertes tonelajes de material, sacrificando el grado de reducción en el tamaño de las piedras molidas. La tendencia moderna es hacer máquinas de gran capacidad aunque sólo reduzcan los trozos a fragmentos que sean la cuarta o la sexta parte del tamaño original con lo que se obtiene una gran economía en el costo unitario de molienda, cuando se trata de plantas de gran capacidad, de 1000 o más toneladas por día. Esta tendencia ha multiplicado el número de etapas de molienda entre dos límites dados

y que por consiguiente se fabriquen máquinas de diversos tipos, para recibir trozos de tamaños intermedios. Entre los tamaños de 6 y 1 pulgada se pueden emplear hoy una gran variedad de máquinas de molienda que satisfacen las condiciones más variadas que puede exigir el trabajo:

- Trituración o quebrantamiento de las menas.
- Molienda intermedia, o granulación.
- Molienda fina o pulverización.

### **3.3.1. Trituración (fracturación / quebrantamiento).**

Se deben moler trozos de minerales de dimensiones a veces muy grandes hasta el tamaño de una arena o polvo fino, esta pulverización no se puede efectuar en una misma máquina y en una sola operación. Se requieren por lo tanto varias operaciones sucesivas y coordinadas para reducir a polvo fino trozos de roca que tengan dimensiones de un pié o más de tamaño.

Según el tamaño de los trozos a moler y el tamaño a obtener, será el tipo de máquina que se emplee en cada operación. La Fracturación de trozos gruesos de piedra se efectúa en máquinas pesadas las que aplican, para la trituración de éstos, esfuerzos mecánicos de presión. La trituración de piedras de cualquier tamaño hasta fragmentos de 2 a 3 pulgadas se llama generalmente quebramiento, trituración o molienda gruesa (en inglés crushing). Para estas operaciones se emplean máquinas especiales de varios tipos según la capacidad y demás circunstancias que regulen la operación.

### **3.3.2. Granulación, pulverización o molienda fina.**

La reducción de trozos de un tamaño comprendido entre 1 y 3 pulgadas, en su mayor dimensión, hasta convertirlos en granos de 1 mm o menos se suele llamar granulación, pulverización o molienda fina (en inglés: grinding). En esta etapa de la molienda se emplean una gran variedad de máquinas y dispositivos según sean los factores que rijan las condiciones de operación.

En la molienda intermedia se muelen trozos de minerales de un tamaño comprendido entre 2 y hasta 6 pulgadas a granos de dimensiones hasta de 1 ó 2 mm, mediante operaciones se disponen de una gran variedad de máquinas, cada una de las cuales satisface a condiciones determinadas del trabajo. En la molienda fina o pulverización se aplican procedimientos para reducir fragmentos de minerales



de un tamaño comprendido entre 1 y 2 pulgadas al estado de polvo de diversos grados de finura.

La molienda intermedia y la molienda fina pueden hacerse también en varias etapas; pero salvo el caso en que se trata de instalaciones muy grandes, que pasen enormes volúmenes de roca, es corriente usar una sola etapa y un mismo tipo de máquina para realizarlas.

Los objetivos de la pulverización pueden ser muy variados según el propósito que se persiga a hacerlo y el tratamiento subsiguiente que ha de experimentar el mineral. En las plantas de concentración, el primer objetivo es el de desmenuzar las partículas que integran el mineral valioso, de la ganga que lo acompaña y, en muchos casos, unas especies valiosas de otra. El ideal sería que cada grano proveniente de la molienda estuviera constituido íntegramente por una sola y única especie de minerales. En segundo lugar puede ser necesario que las partículas de la substancia valiosa tengan el grado suficiente de pequeñez para poder aplicarles el método de concentración adecuado, algunos de los cuales, como la flotación, exigen grano fino de malla 48 ó menos para que el resultado sea efectivo. Si el mineral se va a cianurar, mientras más finas sean las partículas de oro más fácilmente se disolverán en el cianuro. En el beneficio de minerales no metálicos, como el talco, los ocre, etc., la pulverización se practica principalmente para satisfacer las exigencias del mercado, ya que no se trata de hacer separación alguna.

Por otro lado, un exceso de pulverización, llevada más allá del límite exigido por el proceso a que se va a someter, además de ser un gasto innecesario, puede conducir a fuertes pérdidas en el tratamiento, especialmente si se trata de concentraciones gravimétricas en las que los las lamas, aún de las especies valiosas y muy pesadas, no pueden ser cogidas satisfactoriamente. Para la cianuración, una molienda llevada demasiado lejos no es perjudicial al tratamiento, salvo por el gasto innecesario que implica una remolienda excesiva. La molienda (granulación y pulverización) es la última etapa del proceso de conminación o fragmentación para la reducción del tamaño de las partículas. Los tamaños de salida de los productos de esta etapa, según Hukki (ETSIMV, 1996), serán los siguientes:

**Tabla 3.3: Clasificación del tipo de molienda.**

<b>Tipo de Molienda</b>	<b>Tipo de proceso</b>	<b>Tamaño de salida de los productos</b>
Molienda Gruesa	Granulación	1 mm
Molienda Fina	Pulverización	100 $\mu\text{m}$
Molienda Ultrafina	Pulverización	10 $\mu\text{m}$

Se puede encontrar también la siguiente clasificación según el tamaño de salida del producto:

**Tabla 3.4: Otra clasificación del tipo de molienda.**

<b>Tipo de Molienda</b>	<b>Tipo de proceso</b>	<b>Tamaño de salida de los productos</b>
Molienda Gruesa	Granulación	1-2 mm
Molienda Media	Pulverización	200-500 $\mu\text{m}$
Molienda Fina	Pulverización	50-100 $\mu\text{m}$

La pulverización se clasifica, a veces, según el tamaño al que se lleva, como; pulverización gruesa, cuando el producto obtenido está, digamos, entre las mallas 6 y 20 como tamaño máximo de los granos; como pulverización intermedia, cuando el producto pulverizado pasa todo por la malla 28 encerrando además un 75% de su conjunto que es menor que la malla 200; y como pulverización fina cuando el grano más grande producido pasa por la malla 100. Esta subdivisión de los grados de finura de la pulverización no quiere decir que ésta se efectúe, salvo casos excepcionales, por etapas. Sirve más bien para indicar el punto hasta el cual se lleva la pulverización en cada planta de beneficio.

### **3.3.3. Molienda húmeda o seca.**

La molienda se puede realizar por vía seca o por vía húmeda:

- Vía seca: Molienda de materiales prácticamente secos (2 % de agua) o con una determinada humedad (30 % de agua).
- Vía húmeda: Molienda de materiales que forman una pulpa (30-300 % en peso de agua).

Las plantas de concentración en húmedo usan siempre la molienda en forma de pulpa, pero hay muchas instalaciones industriales que muelen en seco. La capacidad, el consumo de Energía, el desgaste de las bolas y de los forros, son mayores cuando se muele en agua que cuando se muele en seco. La molienda en

agua permite trabajar en circuito cerrado y tiene además la ventaja de eliminar el polvo.

Factores que determinan el tipo de molienda (molienda húmeda o molienda seca):

- El tipo de etapa siguiente (húmeda o seca).
- La disponibilidad de agua.
- La molienda húmeda precisa menos energía por tonelada de mineral tratado (la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos).
- La clasificación en medio húmedo exige menos espacio que la clasificación en seco (bombas, tubos, etc.).
- La molienda por vía húmeda no necesita captadores de polvo y existe menos calentamiento de los equipos.
- La molienda por vía húmeda tiene un mayor desgaste de cuerpos moledores y blindajes de acero que la molienda por vía seca (principalmente debido a la corrosión), hasta 6 u 8 veces superior.
- Existen sustancias que reaccionan con el agua, produciéndose cambios físico-químicos (clinker del cemento).

#### **3.3.4. Circuito de molienda cerrado o abierto**

Los equipos pueden trabajar en circuito abierto o circuito cerrado; se dispone una criba o clasificador a la salida del producto que devuelve los sobre tamaños. El circuito cerrado se emplea en molienda con bolas o autógena. El circuito abierto se emplea generalmente en la molienda con barras.

En los molinos de bolas, cilíndricos o cónicos, no hay ningún mecanismo que limite el tamaño máximo del producto molido. Mientras mayor sea la cantidad de mineral que se alimenta a estos aparatos más grueso será el producto. Por otro lado, si se quiere que el material que salga del molino no pase de una dimensión dada, habrá que disminuir la alimentación en forma tal que se reducirá fuertemente la capacidad de la máquina, se aumentaría el costo unitario de la molienda y no habría medio de evitar que se produzca una fuerte cantidad de finos.

Para remediar estos inconvenientes se muele en lo que se llama circuito cerrado. En este arreglo la descarga del molino se recibe en un aparato clasificador, ya sea un cono hidráulico (hidrociclón) o un clasificador mecánico de rastrillo. El clasificador se regula en forma tal que descargue todo el material que está molido

hasta un tamaño predeterminado; las partículas de mineral que están a mayor tamaño son retiradas del clasificador y enviadas nuevamente al molino. Estos aparatos clasificadores descargan las partículas finas por rebalse mientras que las arenas gruesas son descargadas por medio de rastrillos, o por el fondo del cono, en caso de usarse este tipo de clasificador. Gracias a esta combinación de circuito cerrado se puede alimentar un molino de bolas sin que se produzca un exceso de material grueso y puede graduarse la alimentación hasta encontrar el punto máximo de la capacidad conveniente para un determinado molino a un grado de finura dado. Generalmente en las plantas los molinos de bolas muelen en circuito cerrado. Solamente en grandes instalaciones, donde la pulverización se efectúa en dos o más etapas, el primer molino de bolas puede trabajar en circuito abierto, pasando su producto, que será relativamente grueso, a alimentar los molinos subsiguientes.

Sin embargo, aún en instalaciones donde la pulverización se efectúa en tres molinos sucesivos, se aconseja usar clasificadores no solo para cerrar el circuito de molienda sino también para despojar el mineral que se alimenta, de todas las partículas finas, antes de entrar al primer molino. Moliendo en circuito cerrado, si se requiere un producto de un grado de finura dado, la capacidad del molino se acrecienta considerablemente usando un clasificador y este acrecentamiento se hace mayor si se aumenta la carga circulante que regresa del clasificador al molino. Esta carga circulante, rara vez es menor de dos veces el tonelaje de mineral nuevo que se alimenta desde la tolva. Esto significa que si el molino recibe cien toneladas diarias de mineral nuevo para molerse, en el curso de algunos días de trabajo continuo, se encontrará que el clasificador devuelve diariamente al molino 200 toneladas de material incompletamente molido. Entonces se dice, desde luego impropriamente, que el tonelaje circulante es de 200 por ciento, o sea 200 toneladas de retorno por cada 100 toneladas alimentadas, lo que en buena cuenta significa que, en este caso, pasarán diariamente por el molino 300 toneladas en total. A veces, si conviene recargar la alimentación, el tonelaje circulante puede pasar de mil por ciento. A primera vista puede parecer extraño que la carga circulante entre un clasificador y un molino que produzca, digamos, cien toneladas de producto terminado por día, pueda llegar a 400 o más toneladas.

La tendencia a usar tonelajes circulantes cada vez mayores en el circuito cerrado de molienda, trae como consecuencia ciertos requerimientos mecánicos exigidos para los molinos de bolas, clasificadores y equipo auxiliar. Los molinos se

hacen de un diámetro relativamente grande y de pequeña longitud, provistos de alimentadores de tamaño mayor que el usual y se da a los muñones de carga y descarga tamaño suficiente para una capacidad diez veces mayor a la del tonelaje de alimentación nueva que deben recibir. Hay que vigilar, durante la marcha la carga de bolas del molino a fin de que ésta, que sufre mayores desgastes por el exceso de tonelaje, no llegue a estar por debajo del peso normal. Esto puede efectuarse instalando vatímetros que sirvan de guía con respecto a la correcta carga del molino. Igualmente los clasificadores deben ser de amplia capacidad y de sólida construcción, de acuerdo con el tonelaje que deben clasificar y retornar, Al instalar estos clasificadores debe cuidarse de que la arena que ellos devuelven al molino son descargadas a suficiente altura como para que baje, por sí solo, por gravedad, al cajón alimentador del molino. Si esto no fuera practicable, habría que colocar el clasificador a mayor altura que la descarga del molino puesto que es más fácil levantar ésta, por medio de algún dispositivo especial, ya que se trata de una pulpa más aguada y menos abrasiva, que eleva las arenas descargadas por el clasificador.



**Fig.3.2: Molino de bolas cilíndrico tubular de 14'øx41', Nordberg, para molienda fina y húmeda de mineral de hierro, uno de los 5 instalados en la planta de molienda de una minera nacional del Sur.**

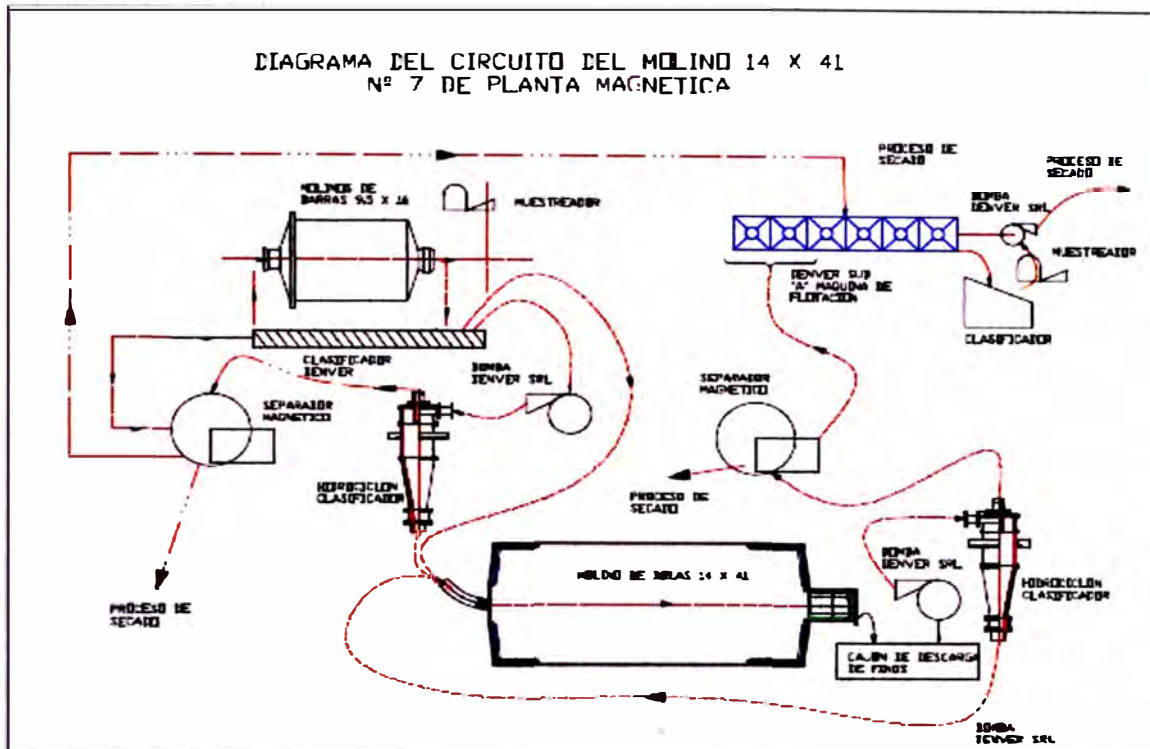


**Fig.3.3: Planta de molienda (granulación y pulverización)**

La planta de molienda húmeda (con agua de mar) objeto de este trabajo es alimentado de mineral ( $\text{Fe}_3 \text{O}_4$ ) de la planta de chancado (trituration) de  $- \frac{3}{4}$  al 100 %, que es transportado mediante fajas transportadoras hacia ocho molinos de barras que están en paralelo, los cuales reducen en forma húmeda hasta el tamaño de 0.1 a 1 mm . El mineral molido se alimenta a un conjunto de cinco molinos cilíndricos tubulares de 14'Øx 41' y tres de 10'Øx 22', ver plano en pendice todos ellos en paralelo, de los cuales sale el mineral de tamaño malla 200(0.074 mm) a 250. Esta planta procesa actualmente de 4 000 000 a 14 000 000 toneladas al año.

Los molinos de barras se alimentan mineral con CP al 70% de agua de mar por su abundancia y bajo costo, manteniéndose la misma concentración a lo largo del todo proceso de molienda. Los molinos de bolas descargan sus productos a los respectivos separadores magnéticos, donde el mineral es liberado de partículas de Fe, pasando el resto a sus respectivos clasificadores (tipo hidrociclón), el over flow (mineral fino) a las celdas de flotación, y el under flow regresa al molino de bolas.

**Fig.3.4: Diagrama del circuito cerrado del molino 14x41.**



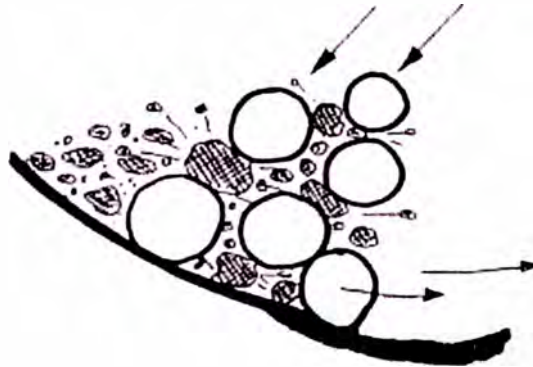
### 3.3.5. Equipos del proceso de pulverización.

Las máquinas de pulverización no son las más económicas y las más prácticas para producir material cuyo tamaño máximo molido sea el de la malla 20, o más fino, y es posible que sean también las más adaptables y económicas para producir granos un poco mayores, como de la malla 10 y aún de la malla 6. La escala de reducción límite de estas máquinas es muy grande; está comprendida desde 8 y hasta 25 a uno. Por otro lado, hay para cada una de ellas un tamaño máximo de alimentación, dentro del cual puedan efectuar un trabajo más eficaz, así como una escala máxima de reducción posible, para un determinado tipo de molienda, para alimentación de un tamaño máximo dado, de una determinada clase de roca.

#### 3.3.5.1. Principios mecánicos en los equipos de pulverización

Las máquinas que se emplean en esta etapa de la molienda, utilizan el golpe y la fricción para pulverizar los granos. El golpe debe ser frecuente y de la fuerza suficiente para romper las partículas de mineral; debe ser producido por el mayor número posible de elementos que realicen el golpe en numerosos y diversos puntos. La fricción tiene para esta molienda una importancia relativamente menor, aunque para ciertos tipos de minerales resulta muy efectiva para su pulverización.

Según Digre, cuando se desea moler por impacto, las barras elevadoras deben ser suficientemente altas para levantar el material, mientras que las piezas del revestimiento han de ser lo bastante gruesas para impedir el corte pasante del material contra la carcasa cilíndrica.



**Fig.3.5: Mecanismo de molienda por impacto.**

La molienda fina (pulverización) de los minerales, se efectúa por presión y fricción o desgaste. Lo importante en los aparatos de pulverización es la manera de aplicar la percusión y el desgarramiento a las partículas, en forma tal, que produzca un fricciónamiento múltiple de ellas. Como el producto deseado es el polvo fino, los medios de desmenuzamiento deben golpearse unos a otros para aplicar la necesaria fuerza de ruptura a los granos que se encuentran entre ellos.



**Fig. 3.6 : Mecanismo de molienda de desgaste por rozamiento.**

Este es el método normal de trituración en la mayoría de los molinos de bolas y piedras. Si la molienda no es demasiado fina, el perfil de la barra elevadora y su altura deben ser adecuados para aferrar firmemente la carga y producir una elevación satisfactoria. Si las barras elevadoras son demasiado altas la carga



saltará en forma de catarata, generando presiones de cama demasiado bajas.

En la molienda terciaria y retrituration, el perfil de la barra elevadora ha de ser más bajo para poder tener al máximo la presión de la carga. Son adecuados los tipos de resalto a traslape, ondulado y otros revestimientos similares bastante lisos; pero estos revestimientos, una vez gastados, originan deslizamiento. Según Di ORE, en la molienda autógena primaria el 50 al 80% del trabajo se efectúa por la abrasión mutua de las rocas. La mena se desgasta por sí misma. Las consideraciones de capacidad y desgaste hacen aconsejable utilizar un conjunto de barras elevadoras de dos alturas, cuyas barras altas queden a una distancia sobre la envolverte cilíndrica aproximadamente igual al tamaño máximo de la alimentación. En estos tipos de molino se ha visto que es aconsejable mantener la rotación a un 70% de la velocidad crítica para evitar un efecto de catarata excesivo, resultando en la quebrantación por impacto de las piedras más grandes.

Existen tipos de máquinas para la molienda fina que usan solamente la fricción como los molinos Huntington, los Raymond, las arrastras, los panes para la amalgamación y molienda simultánea, y otros tipos anticuados que van poco a poco desapareciendo para ser reemplazados por los molinos de bolas, sobre todo, en las plantas de concentración de minerales metalíferos.

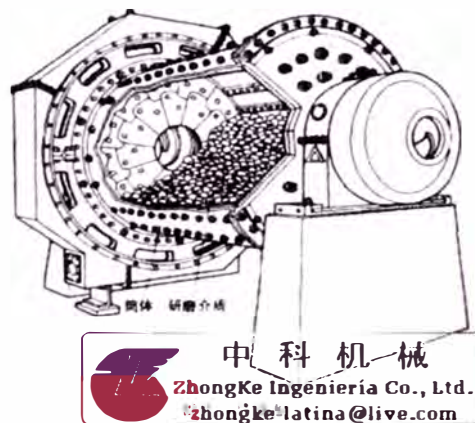
Estos principios mecánicos tienen su realización efectiva en los molinos de bolas y aparatos similares, en los cuales, dentro de un tambor giratorio, se carga un gran número de cuerpos duros y pesados, como bolas o barrotos de acero, los que, al girar el tambor, ruedan y golpean entre sí en forma continua. Si dentro de estos tambores alimentamos el mineral a moler, sus partículas serán cogidas y golpeadas por las bolas o las barras de acero, provocando así su desintegración. Los molinos de bolas y aparatos similares son las máquinas más generalmente usadas hoy en la pulverización, la que se efectúa dentro de ellos por el efecto simultáneo de numerosos impactos y por la fricción de las bolas contra las paredes interiores del cilindro.

#### **3.3.5.2. Molinos de Tambor Giratorio**

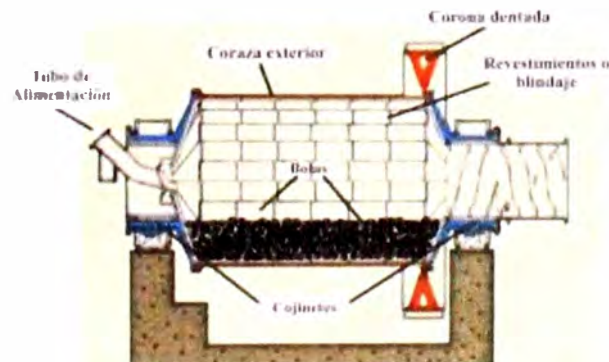
Genéricamente estas máquinas están constituidas por un tambor cilíndrico, o de otra forma, cuyo eje de giro horizontal pasa por el eje geométrico de la máquina. La trituración del mineral se efectúa dentro de estos tambores por efecto de caída o choque de los cuerpos pesados y duros encerrados, lo mismo que el mineral dentro de ellos, como consecuencia del movimiento giratorio de los

tambores. Una primera clasificación de estos molinos es por el tipo de molturadores o cuerpos pesados que se emplean para la molienda:

- Molino de bolas.
- Molino de guijarros, emplean trozos de roca dura como medios de molienda. También se ha llegado a utilizar como cuerpos molturantes guijarros de sílex o porcelana cuando se pretende evitar la contaminación del mineral a causa del desgaste del acero.
- Molino de barras (varillas), usan barras metálicas de sección circular o poligonal, prácticamente del mismo largo del cilindro, las que al caer, durante la rotación del tambor, producen el efecto triturador buscado.
- Molinos autógenos (AG) Los cuerpos de molienda van a ser el propio mineral
- Molinos semiautógenos (SAG). Los cuerpos de molienda van a ser un porcentaje de mineral y otro de bolas u otro tipo.



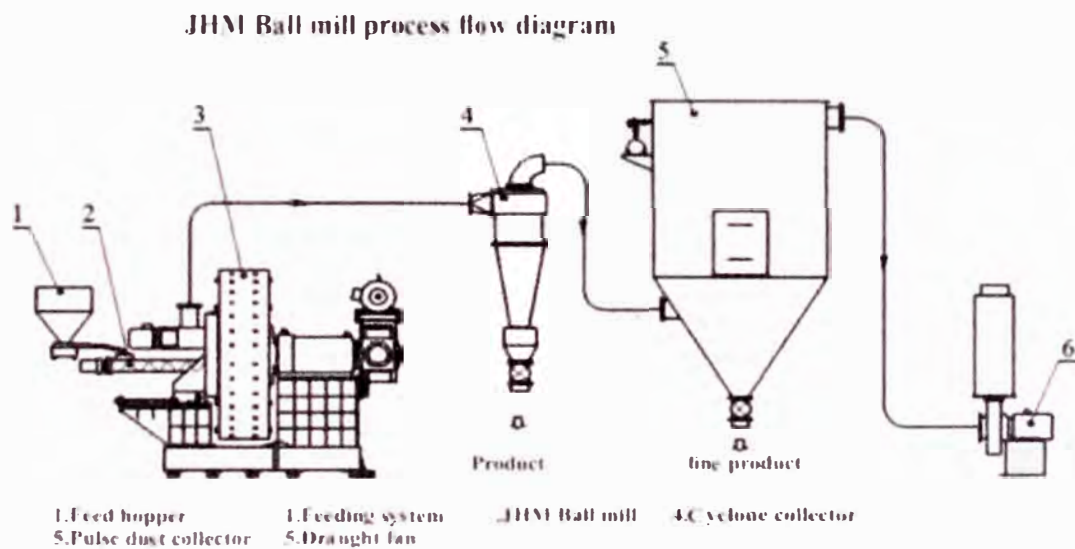
**Fig. 3.7: El Molino de bolas se emplea para moliendas finas.**



**Fig. 3.8: El Molino de barras se emplea para moliendas más gruesas.**

Atendiendo a la forma del molino podemos dividirlos en:

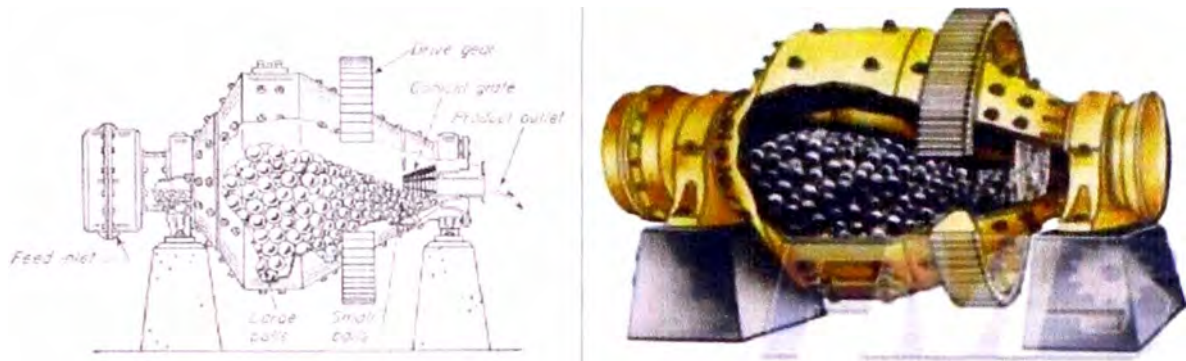
- a) Molinos cilíndricos y estos a su vez subdividirlos en
  - Molinos cortos, cuyas longitudes varían de 1 a 2 veces el tamaño del diámetro del cilindro, generalmente usados para moliendas finas corrientes
  - Molinos tubulares, cuyas longitudes o alturas son varias veces el tamaño del diámetro, y son usados para molienda extrafina.
- b) Molinos cónicos, formados por dos troncos de cono unidos por sector cilíndrico



**Fig. 3.9: Molino cilíndrico corto de bolas JHM**



**Fig. 3.10: Molino cilíndrico tubular**



**Fig. 3.11: Molino cónico de bolas**

Un molino Trabaja en forma discontinua, cuando éste se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, terminada esta operación, el molino se abrirá para a continuación separar el mineral de los cuerpos molturantes. Esta forma de trabajar se utiliza en molinos pequeños de laboratorio.

Un molino Trabaja en forma continua, cuando éste se alimenta de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo (o por el centro según el molino). La operación únicamente se detendrá para trabajos de mantenimiento o recarga de los cuerpos molturantes. En la industria minera y producción de áridos, se trabaja siempre de forma continua.

### **3.3.5.3. Rendimiento mecánico de las máquinas de molienda**

Siendo la molienda, la operación que mayor cantidad de energía consume entre las operaciones de concentración y siendo los dispositivos empleados los que significan un mayor costo inicial de instalación así como de operación, el dato de la energía consumida es de sumo interés.

Este costo es el número de caballos de fuerza-hora (kW-hora) que se necesita para moler una tonelada de mineral de una roca de dureza conocida, desde un tamaño dado hasta otra dimensión igualmente fija. Este consumo de energía por tonelada dependerá, para una misma dureza de roca, del mecanismo que se emplee para la aplicación de la energía (de donde se obtiene la fuerza para la molienda); del tamaño o capacidad de la máquina; y de si se trata de molienda gruesa o molienda fina.

Para la comparación de la eficiencia mecánica de distintos tipos de máquinas, moliendo entre límites dados, es más práctico y al mismo tiempo más fácil de determinar, el tonelaje por caballo-hora (kW-hora) que cada aparato muele.

En las plantas modernas de molienda hay dispositivos que registran automáticamente el número de toneladas de mineral que pasan por la molienda. Dividiendo este tonelaje por el número de caballos-hora que ha empleado la máquina se obtendrá el coeficiente que se busca.

La Energía que se necesita en la planta para efectuar una etapa, entre ciertos límites de tamaño de una molienda dada, se conocen de antemano para cada dispositivo y tamaño de aparato por medio de las características de las distintas máquinas (catálogos de fabricantes) que incluyen siempre que sea posible el tonelaje por caballo-hora, que según la experiencia, puede rendir cada tipo de máquina tratándose de roca de dureza normal.

Estos molinos se fabrican por numerosas firmas comerciales y de tamaños variados. La tabla que sigue, recopilada de catálogos, indica las dimensiones, peso de bolas que deben tener, velocidad de marcha y potencia requerida que debe instalarse para cada tipo.

**Tabla 3.5: Características de los diversos molinos cilíndricos tubulares de bolas**

modelo	velocidad gratona(r/ min)	número de pelota(t)	tamaño de alimentación entrada(mm)	tamaño de alimentación salida (mm)	capacidad(t/ h)	potencia de motor (KW)	peso (T)
Φ900×1800	38	1.5	≤20	0.075-0.89	0.65-2	18.5	3.6
Φ900×3000	38	2.7	≤20	0.075-0.89	1.1-3.5	22	4.6
Φ1200×2400	32	3.8	≤25	0.075-0.6	1.5-4.8	45	12.5
Φ1200×3000	32	5	≤25	0.074-0.4	1.6-5	45	12.8
Φ1500×4500	32	7	≤25	0.074-0.4	1.6-5.8	55	13.8
Φ1500×3000	27	8	≤25	0.074-0.4	2-5	90	17
Φ1500×4500	27	14	≤25	0.074-0.4	3-6	110	21
Φ1500×5700	27	15	≤25	0.074-0.4	3.5-6	132	24.7
Φ1830×3000	24	11	≤25	0.074-0.4	4-10	130	28
Φ1830×4500	24	18	≤25	0.074-0.4	5-12	155	32
Φ1830×6400	24	23	≤25	0.074-0.4	6.5-15	210	34
Φ1830×7000	24	25	≤25	0.074-0.4	7.5-17	245	36
Φ2200×5500	21	30	≤25	0.074-0.4	10-22	370	48.5
Φ2200×6500	21	30	≤25	0.074-0.4	14-26	382	52.8
Φ2200×7500	21	33	≤25	0.074-0.4	16-29	475	56

### 3.3.6. El molino cilíndrico de bolas.

La mayoría de estos aparatos muelen generalmente en húmedo, salvo algunos de tipo tubular que a menudo muelen en seco, especialmente cuando preparan materiales muy pulverizados para usos industriales, como cemento, etc.

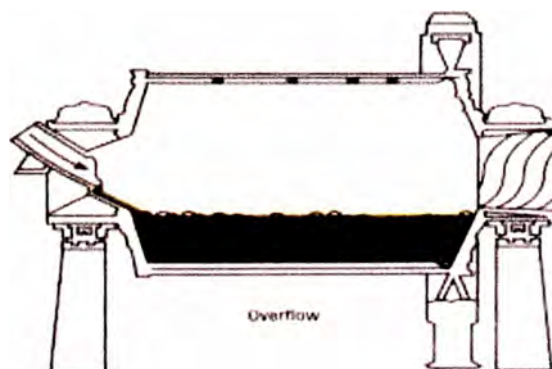
#### a) Características generales del Molino Bolas

- El mineral que ingresa al molino de bolas se fractura por:
  - ✓ Ciclo cascada (fractura por impacto)
  - ✓ Cizalla interior (fractura por abrasión o atricción)
- Funciona entre el 35 % y 45% el nivel de llenado.
- Medio de molienda: bolas de acero.
- Característica: pulveriza entre 0 a 200 micras
- Generalmente trabaja en circuito cerrado.
- Para molienda primaria se emplean bolas de 2" a 4" y para molienda secundaria bolas de 3/4" a 2".

**b) Clasificación en función de la descarga y Aplicaciones:**

- Molino de descarga por rebose (descarga libre o de rebalse natural):

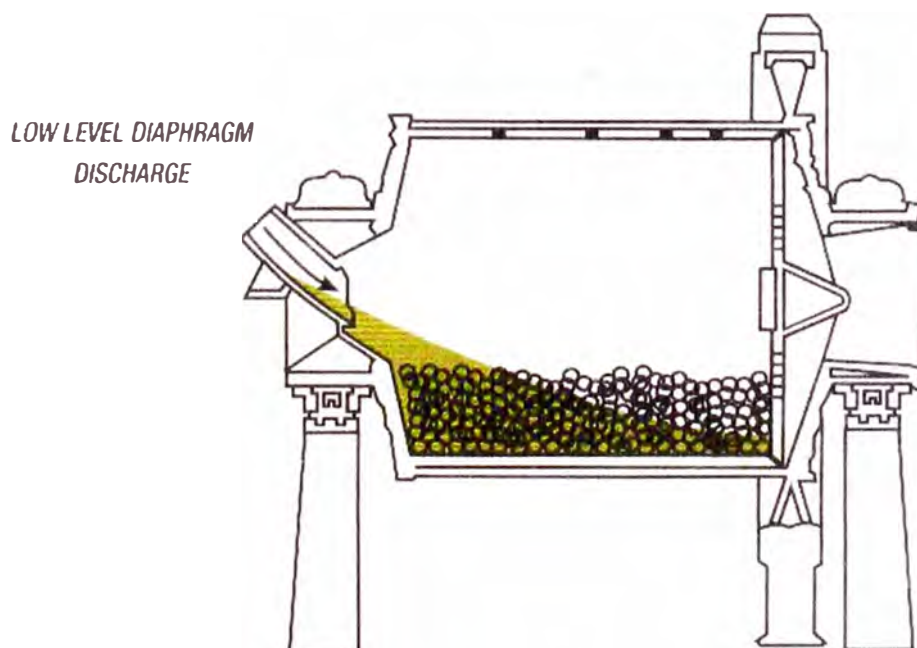
El mineral a moler se alimenta al tambor rotativo por una de sus tapas, acompañado generalmente de una pequeña proporción de agua. Por efecto de la rotación del cilindro el mineral alimentado se tritura dentro del él por el golpe de las bolas, originado por el giro del tambor. Dentro del molino, el mineral y las bolas están íntimamente mezclados y ocupan prácticamente, entre ambos, la mitad o algo más del volumen del molino. Como las alimentación es graduada y continua, las partículas de mineral alimentado, que viajan del extremo de carga al otro extremo, llegan al lado opuesto empujadas por la corriente continua de mineral que se hace entrar a la máquina, se descargan en forma continua también, por el tubo que se encuentra en la tapa. El molino de bolas de descarga libre o de rebalse natural, se suele llamar overflow Mili o Center-Di sehnрге Mili.



**Fig. 3.12 : Molino de bolas de descarga por rebose (Cortesía de Nordberg). Se emplean en moliendas muy finas con tamaños de alimentación entre 10-15 mm, Carga circulante entre 300-500 %. (Trabajando en circuito cerrado).**




- Molino de descarga por rejilla:

Otro tipo de molinos de bolas tiene, a pequeña distancia de la tapa de descarga, un diafragma circular hecho generalmente de parrillas de acero, que tiene aberturas graduables que permiten pasar la pulpa con el material molido, por la periferia del diafragma, desde el punto en que este toca con la pared interior del cilindro, hasta una cierta altura, predeterminada, manteniendo las bolas y el mineral que está en trituración, en la parte del cilindro comprendida entre el diafragma y la entrada de la alimentación. El material molido que se pasa al espacio comprendido entre el diafragma o parrilla y la tapa de descarga, es levantado por el molino mismo en su giro, por medio de aletas, y descargado por el tubo que existe en la tapa de descarga. Estos molinos se llaman de diversos modos tales como: de diafragma, de parrilla, de descarga periférica, de descarga acelerada, etc., en todo el resto de su funcionamiento actúan en forma igual que los molinos de descarga libre.



**Fig. 3.13 : Molino de bolas de descarga por rejilla (Cortesía de Nordberg). Se emplean para moliendas gruesas (granuladas) (60-80  $\mu\text{m}$ ), con tamaños de alimentación de hasta 50 mm. Estos molinos son adecuados para molienda en seco.**

**Tabla 3.6 Principios generales que presiden el funcionamiento, confección y marcha de los molinos cilíndricos de bolas.**

TIPUS DE DESCARGA			
	REBUSE	DESTRAGMA	COMPARTIMENTADO
TIPUS DE MOLIENDA	HÚMEDA	SECA HÚMEDA	SECA HÚMEDA
TIPUS DE CERRADIS	CERRADO	SEMIABERTO	CERRADO O ABIERTO
TAMANY DE MOLIENDA	FINE MALLA 100	INTERMEDI (VIA HÚMEDA) MALLA 60-100; FINE (VIA SECA) MALLA 300	FINE MALLA 150-300
TAMANY MAXIMU DE ALIMENTACIÓ	MALLA 10 - 14	< 1/2"	< 1/2"
RELACIÓ L/D	1.10 - 1	1.10 - 1	1.10 - 1 1.10 - 1 1.10 - 1
% TIPUS DE VEL. CRÍTICA	60-70%	60-70%	1.10 - 1 1.10 - 1 1.10 - 1
% DE CARGA	40-45%	20-30%	30-50%

### c) Partes fundamentales:

- **Casco(Shell)cilíndrico**

Es de hierro o acero grueso, a cuyas extremidades se fijan, por medio de soldadura, remaches o pernos, tapas fabricadas del mismo material. Estas tapas, que son casi siempre ligeramente convexas hacia fuera, tienen en el centro, y formando parte de ellas mismas, un especie de tubo o conducto circular llamado muñón (en inglés trunnion) que se prolonga 20 ó más centímetros hacia fuera y que desempeña la doble función de servir de apoyo o eje de giro del cilindro y al mismo tiempo de ser los conductos para la entrada del mineral, por un lado, y para la descarga del molido, por el otro. El cilindro provisto de sus dos tapas que le sirven de eje, se apoya sobre descansos o chumaceras de amplia superficie; se llena con la carga necesaria de bolas de diversos tamaños, de acuerdo con ciertas reglas determinadas, y se le hace girar por algún dispositivo mecánico adecuado.

- **Forros o corazas (Revestimiento o Blindaje)**

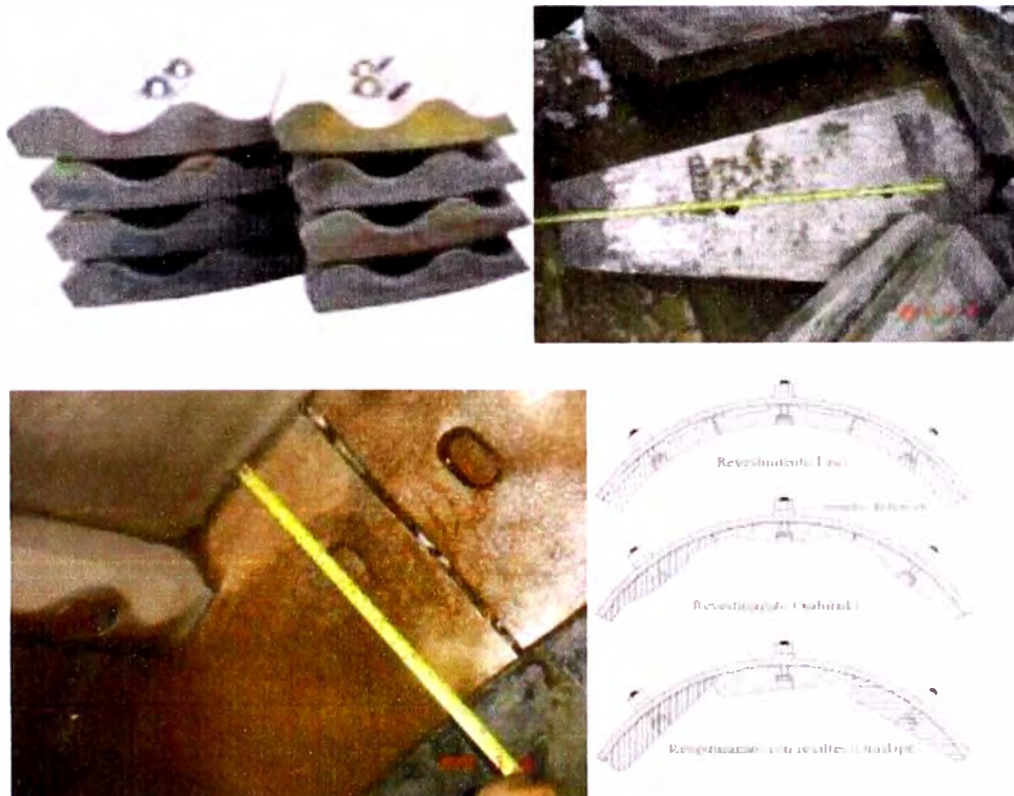
En el interior de todos los molinos, cualquiera que sea el tipo, se encuentra un revestimiento formado comúnmente por placas de acero especial, muy duro y resistente al desgaste, aleado generalmente con Mn o Cr, que se ajustan firmemente tanto a la superficie interior del cilindro como a las tapas y a los conductos de entrada y de salida del mineral.

Estos revestimientos pueden estar fabricados en alguna ocasión de cerámica (habitualmente están fabricados de acero fundido o acero laminado



debido a sus características resistentes), también se fabrican de caucho natural y su empleo se ha difundido bastante, pero es más adecuado para molinos de bolas que traten mineral muy duro (en aquellos casos donde no se sobrepase los 80°C y no entre en contacto con reactivos de flotación).

Las placas de revestimiento de acero se hacen en formas muy diversas. Hay unas que dan al interior del cilindro una superficie regular; otras que forman resaltes interiores, paralelos al eje del cilindro. El espesor de las placas de forro de acero varía desde dos pulgadas, en los molinos pequeños, hasta cinco en los de gran diámetro. Estos blindajes presentan resaltes o nervios que favorecen el movimiento de la carga del molino (fig.3.15).



**Fig. 3.14: Diferentes diseños de revestimiento de acero.**

Las piezas intercambiables, que forman el blindaje del molino, deben cumplir las siguientes funciones:

- ✓ Ser resistente a los impactos y a la abrasión.
- ✓ Proteger la carcasa del molino contra la corrosión y el desgaste.
- ✓ Minimizar el deslizamiento entre los cuerpos moledores y el tambor, favoreciendo un adecuado volteo del mineral.

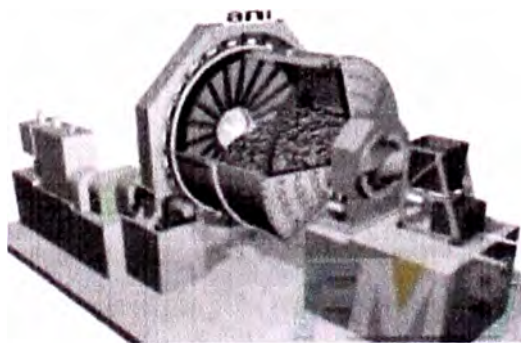
- Bolas

Las bolas, son de acero forjado, al cromo o al manganeso. La carga de bolas más eficiente es normalmente el 55% del vacío interior. Es común usar bolas de distintos tamaños, dependiendo del tamaño máximo que tiene el material que se alimenta. Se recomienda por lo general usar las bolas más pequeñas a que se pueda en relación al tamaño del material que se alimenta el molino. Otros operadores, creen que el mayor rendimiento se obtiene con bolas de cinco pulgadas para cualquier tamaño de alimentación.

Las bolas que se agregan para reemplazar a las que se gastan, son siempre las de mayor tamaño solamente. El peso de bolas que se agrega se calcula por día, de acuerdo con el promedio de consumo (desgaste) con relación al tonelaje pesado. Un método mejor de regulación, consiste en determinar cuál es el gasto de energía eléctrica que corresponde al máximo de eficiencia y mantener el peso de las bolas regulado por ella.

- Alimentadores

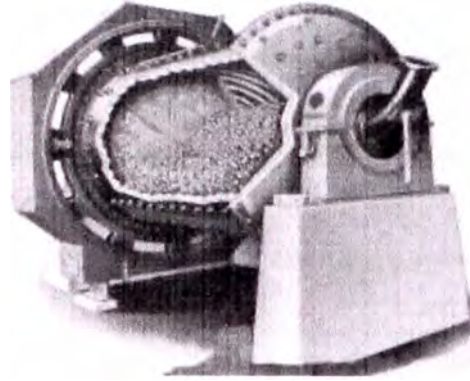
Están acoplados al muñón del extremo de carga del molino, y girando con él se encuentran unos dispositivos, que tienen por objeto coger el material que se va a moler, en una proporción determinada, y llevarlo al interior del cilindro. Los más corrientes son: alimentadores de una cuchara, de tres cucharas y de tambor. En circuito abierto para volúmenes de carga elevados, en torno al 45-50 %, se emplean alimentadores de cangilón de doble cuchara.



**Fig. 3.15 : Molino de bolas con alimentador de cuchara o cangilón (Fuente: Rowland, 2002).**

Para menores volúmenes de carga, se emplean alimentadores de tubo. En circuito cerrado con clasificadores de rasquetas o de espiral se necesitarán

alimentadores de cuchara y con clasificadores tipo ciclón se utilizarán alimentadores de tubo.



**Fig. 3.16 : Molino de bolas con alimentador de tubo (Fuente: Rowland, 2002).**

- **Transmisión del Movimiento**

El movimiento, en los pequeños molinos puede transmitirse directamente por medio de faja a una polea adaptada al molino. Esto aunque barato es poco satisfactorio, pues La faja tiende a resbalar, especialmente cuando se pone en marcha el aparato. Todos los otros molinos usan trasmisión de engranajes. Estos engranajes, son generalmente reversibles, es decir que pueden cambiarse para que los dientes se desgasten igualmente por ambos lados. Hay una gran diversidad de mecanismo para transmitir el movimiento a los molinos y cada constructor de estas máquinas encuentra a menudo la manera de dar mayor solidez y consistencia a los elementos mecánicos que imprimen el movimiento o estos aparatos.

Estos molinos, necesitan motores, que puedan soportar un trabajo pesado y continuo, dando una velocidad constante, bajo una carga igual. El esfuerzo para el arranque es muy grande, debiendo en ocasiones el motor, ser capaz de producir una fuerza de 150 a 200% del poder ordinario de trabajo para la puesta en marcha.

### **3.3.7. Parámetros de operación de los molinos de bolas y Factores que Influyen sobre la Capacidad y la Marcha:**

Los molinos cilíndricos de bolas están hechos para recibir alimentación de dos pulgadas, y en casos excepcionales, pueden alimentarse con trozos algo mayores, pero la máxima eficiencia se obtiene con alimentación menor de dos pulgadas. El producto molido que se espera de estas máquinas puede ser desde malla 10 como máximo, hasta cualquier otro grado menor.

Los molinos de descarga libre, trabajando en circuito cerrado, pueden moler, según su tamaño, desde 15 hasta 600 ú 800 toneladas en 24 horas, dependiendo

de la escala de reducción que se exija, de la dureza de la roca y de los demás factores que intervienen. La eficiencia mecánica de este tipo de molino cilíndrico es muy variable, pudiendo estar comprendido entre 0.06 y 0,25 toneladas por caballo-hora (HP-h). Los motores que se recomiendan para estos molinos varían según el tamaño de ellos, desde 10 hasta 6000 caballos y hay que tener en cuenta que para el arranque, el esfuerzo de la máquina es de 1.5 a 2 veces la fuerza requerida para la marcha ordinaria. La velocidad a que marcha está en relación inversa con el diámetro del molino; en las máquinas grandes es alrededor de 9.5 r.p.m. en las chicas puede llegar hasta 40 r.p.m.

En los molinos cilíndricos de diafragma o parrilla, las capacidades por lo común son algo mayores que los de descarga abierta, de iguales dimensiones; pero en cambio hay también un poco más consumo de energía. El rendimiento mecánico es también en estos molinos algo mayor que en los de descarga libre, pudiéndose llegar a 0.3 t.p.HP-h. La alimentación de dos y hasta dos y media pulgadas es frecuente en estas clases de máquinas.

- **Capacidad de los Molinos cilíndricos de Bolas**

En un molino de descarga por rebose el traslado del material, desde el punto de entrada hasta el punto de descarga, está limitado solamente por la posibilidad del mecanismo alimentador de forzar el material dentro del molino.

**Tabla3.7: características de características de molinos cilíndricos de bolas de fabricación nacional (FUNVESA, COMESA), Ing. Juan Francisco Aguilar Revoredo, Preparación mecánica de minerales, Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de publicaciones, Lima –Perú.**

<b>Características de los molinos cilíndricos de bolas de fabricación nacional (FUNVESA, COMESA)</b>					
<b>Φ</b>	<b>LONG</b>	<b>CARGA DE BOLAS EN LIBRAS</b>	<b>VELOCIDAD EN RPM</b>	<b>POTENCIA DE REGIMEN</b>	<b>POTENCIA DE INSTALACION</b>
3	2	1000		6-8 HP	10 HP
3	3	875-1200	34-40	5-10 HP	15 HP
3	4	1400	32	8 HP	10 HP
3	5	1800-2500	31,5-40	10-15 HP	20-25 HP
4	3	2400-3000	27-29	14-20 HP	20-25 HP
4	4	3000	27-32	18-25 HP	30-40 HP
4	5	3600-5000	27-29	22-28 HP	40 HP
4	6	4200-6000	27-29	26-33 HP	40 HP
4	7	7000	27-39	50 HP	HP
4	8	8000	27	44 HP	60 HP
4,1/2	4,1/2	4480	27	27 HP	40 HP
5	3	4000	26	24 HP	48 HP
5	4	4000-6900	24-28	30-40 HP	50-60 HP
5	5	6400-8600	24-25	36-50 HP	75 HP
5	6	7600-10400	10400	42-55 HP	75 HP
5	7	12100	24	67 HP	100 HP
5	8	13800	10400	75 HP	100 HP
6	3	6000	23	50 HP	75 HP
6	4	8000-9800	22-24	58-62 HP	75-80 HP
6	4,1/2	7000	22	50-75 HP	75 HP
6	5	10000-12000	22-24	72-80 HP	100 HP
6	6	12000-14700	22-24	86-100 HP	100-125 HP
6	7	17000	22	100 HP	1256HP
6	8	19600	22	114 HP	125 HP
7	5	16750-18600	20-20,5	100-150 HP	125-150 HP
7	6	20000-23000	20-20,5	127-135 HP	150 HP
7	7	19750	23	140 HP	210 HP
8	5	22500-25000	18-19	145-150 HP	175 HP
8	6	27000-30000	18-19	150-225 HP	200-225 HP

El molino reducirá el tamaño medio del material que pasa a través de él en mayor o menor proporción, dependiendo de la velocidad con que pasa y de otros factores, tales como la naturaleza del material a moler, tamaño en que éste es alimentado, tamaño a que se requiere el producto, proporción de sólidos en la pulpa

que se alimenta, clase de forro, tamaño de las bolas, peso de la carga de ellas, velocidad del molino, y si se está o no trabajando en un circuito cerrado con un clasificador.

Con molinos de emparrillados el tamaño de la abertura, afecta también la capacidad. El mejor método para expresar la capacidad de estas máquinas, es hacerlo en término de toneladas de material del tamaño alimentado y molido al mínimo realmente producido por el molino, por unidad de tiempo.

La Tabla 3.7, formada con datos suministrados por la práctica y por los fabricantes, da cifras bastante exactas para servir de base a cálculos o proyectos, tratándose de minerales comunes. Para menas muy duras o resistentes, la capacidad, puede reducirse en un 50%.

- **Capacidad de molienda óptima con relación al consumo de energía y el desgaste de forros y bolas del molino cilíndricos de bolas**

Moliendo en circuito abierto, la cantidad de material de cualquier tamaño dado, producido con un molino, aumenta con la velocidad de alimentación. La producción pasa por un máximo que se alcanza más rápidamente, mientras más fino es el tamaño deseado. Por otro lado, la cantidad de producto grueso de un tamaño mayor que el deseado que produce el molino, aumenta también con la velocidad de alimentación y como el objeto de la molienda es reducir todo el material al tamaño deseado, el trabajo en circuito abierto, a alta capacidad, es solamente justificable cuando tomando en consideración la molienda más fina subsiguiente, este sea el medio de obtener un costo inferior por tonelada de producto del grado final de la molienda. Si la cantidad de alimentación, trabajando en circuito abierto, se reduce hasta obtener que la descarga sea toda del grado de finura deseado, la capacidad de la máquina, con relación al consumo de energía (Toneladas por HP- hora), se reducirá a términos inaceptables, y el consumo de forros y bolas, subirá excesivamente. Esto se debe a que una gran parte del material, tendrá que remolarse en exceso para asegurarse que todo el volumen molido, ha alcanzado el grado de finura que se desea. De aquí que para poder aprovechar toda la capacidad de un molino cilíndrico, de pasar grandes tonelajes y producir de ellos una alta proporción de productos reducidos al grado de finura que se desea, por unidad de energía, se recurre al uso de clasificadores que trabajan en circuito cerrado con el molino, devolviéndole, para que pase de nuevo, los granos de material que no han alcanzado la finura que se busca. La molienda en circuito

cerrado, a un tamaño dado, no siempre es más económico que en un circuito abierto.

Cuando la alimentación de un molino de bolas es de un tamaño mayor que 0.75 de pulgada, para los trozos más grandes o cuando aún con alimentación más fina, se trata de moler un tonelaje que reclama el empleo de más de una máquina, resultará casi siempre más barato hacer la molienda en dos o tres etapas. En tal caso sólo el último molino se corre en circuito cerrado y así se aprovecha al máximo la capacidad de los otros molinos.

- **Capacidad con relación al Tamaño del Producto**

Es el factor más importante para determinar la capacidad de un molino de bolas. El promedio de toneladas por HP-hora, tomado de la experiencia, es de 0.200 para molinos que reducen el material a malla 8 o un poco más grueso. Para molinos que muelen a un grado de finura entre mallas 10 y 20 el promedio de tonelaje por HP-hora es de 0.146; cuando se muele a finuras entre malla 28 y 48, el promedio es de 0.090; y de 0.080 cuando se reduce a mallas 65 o más fino. Se supone una alimentación de 2 pulgadas algo más.

- **Capacidad con relación a la Humedad**

Los cambios en la consistencia de la pulpa, afectan la capacidad de los molinos en diversas formas y no siempre puede predecirse el efecto que tendrán. El contenido de agua determina la fluidez de la pulpa y también su poder de arrastre. Cuando el contenido de agua es de ocho a quince por ciento, especialmente si los sólidos contienen materias arcillosas, se forma un barro duro que no puede hacerse pasar por el molino y que impide su operación.

Con más de 20% de agua, las pulpas corrientes son suficientemente fluidas para pasar con cierta facilidad por el molino y esta fluidez va aumentando con la proporción de agua. Para un contenido de agua dado, la aparente humedad de la pulpa es mayor mientras más gruesas son las partículas de los sólidos. La cantidad de humedad de las pulpas tiene diferentes y hasta contradictorios efectos sobre la marcha de un molino. En primer lugar, la fuerza de arrastre de la pulpa, o su poder de transporte, aumenta cuando disminuye la cantidad de agua contenida y por tanto, siendo iguales los demás factores, mientras más espesa es la pulpa, mayor será el tamaño de los trozos grandes arrastrados por ella en la descarga del molino.

En los molinos de parrilla estas partículas gruesas se acumularán contra la reja, dificultando las operaciones. Inversamente aumentando la dilución de la pulpa,

el producto de un molino de descarga libre, central, será más uniforme y fino; mientras que el de un aparato de descarga periférica será más granular. Pero consideradas las cosas bajo otro punto de vista, una pulpa espesa, tiende por otro lado, a aumentar el tonelaje de material fino que se genera en el interior de ambos tipos de molino. Esto se explica considerando el efecto de pulpas espesas o aguadas sobre la superficie de las bolas. Con una pulpa espesa, todas las bolas en el molino, están todo el tiempo recubiertas con una capa adherida de sólidos ya sea que las bolas estén encima o debajo del nivel general de la pulpa, y por tanto cada impacto o cada movimiento relativo de las bolas al chocar entre ellas, producirá efectos molederos. Con pulpas fluidas las bolas que se encuentran por encima del nivel general de la pulpa están prácticamente lavadas y no trabajan, al mismo tiempo que, siendo menor la concentración de sólidos en unidad de volumen, en el seno de la pulpa, los movimientos de la bolas que se encuentran por debajo del nivel de ella tiene un efecto triturante menor que si la pulpa fuera más espesa.

El volumen de pulpa correspondiente a un tonelaje dado de materia sólida, es mayor cuando la pulpa es diluida que cuando es espesa, y con tonelajes iguales de sólidos que pasan a través de un molino, la rapidez del pasaje es mayor con pulpas diluidas y por lo tanto hay menores oportunidades de que las partículas sean molidas. El resultado común de esta combinación de efectos, conduce a disminuir la cantidad de agua de las pulpas cuando se requiere aumentar el tonelaje de material fino producido. La mayor eficiencia o sea el máximo tonelaje del producto deseado en un molino, por día, en la mayoría de los casos, se consigue con pulpas de 25 a 35% de agua, cuando el material se alimenta grueso (1/2 pulgada o mayor tamaño) y entre 30 y 50% de humedad cuando la alimentación es más fina. El consumo de energía por tonelada de sólidos es mayor con pulpas más aguadas.

En la práctica, generalmente, se agrega el agua en el molino para dar a la pulpa la consistencia conveniente. Comúnmente esta agua es necesaria para hacer correr en el canal la arena devuelta por el clasificador. En algunos casos se recomienda, en los molinos cónicos, agregar todo lo que sea posible de agua, no a la entrada, sino a uno y medio o dos pies de la abertura de descarga.

- **Capacidad con relación al Tipo de blindaje.**

Los forros de acero, que tienen superficie ondulada pronunciada, producen golpes más frecuentes de las bolas contra el material a moler y por lo tanto son mejores para moliendas gruesas o Intermedias; pero para moliendas finas la



experiencia prueba que los forros de superficie lisa son mejores. Los molinos con forros de acero ondulados, pueden marchar a menor velocidad para producir un determinado efecto triturador, pero para producir una velocidad dada se requiere en ese caso mayor Energía (Torque) que cuando se usan forros de superficies lisas; sin embargo la Energía consumida es siempre menor, para un efecto triturante determinado, cuando se usan forros ondulados.

- **Capacidad con relación al Tamaño de las Bolas.**

El tamaño de bolas Debe ser proporcionado al trabajo que deben efectuar, es decir al tamaño de las partículas que deben romperse y al tamaño del producto que se desea obtener. Las partículas grandes y duras de mineral se rompen mejor por golpe o impacto, por eso la alimentación gruesa de minerales duros reclaman bolas de mayor tamaño. Pero el impacto es función del peso del cuerpo que golpea y de la altura de su caída, de modo que con molinos de gran diámetro y de gran velocidad y por tanto de caída parabólica libre, las bolas no necesitan ser tan grandes. El tamaño máximo corriente es de cinco pulgadas, pero en algunos pocos lugares se han usado de 6 y hasta 7 pulgadas. En algunas plantas de molienda se ha encontrado que las bolas de cinco pulgadas no producían buen efecto y hubo de emplearse con éxito otras de siete pulgadas.

Las bolas del tamaño menor de una pulgada, tienden a descargarse automáticamente en los molinos de salida libre, cuando la pulpa es gruesa y cuando la carga de bolas es fuerte. La supresión de las bolas de pequeño tamaño se basa en el razonamiento de que un trozo de material, puede ser golpeado lo mismo por una bola pequeña que por una grande, y si la bola pequeña es incapaz de romperlo, el golpe es perdido; de aquí que no deben de encontrarse dentro del molino bolas que no sean capaces de romper la partícula de mayor tamaño que entra por la alimentación.

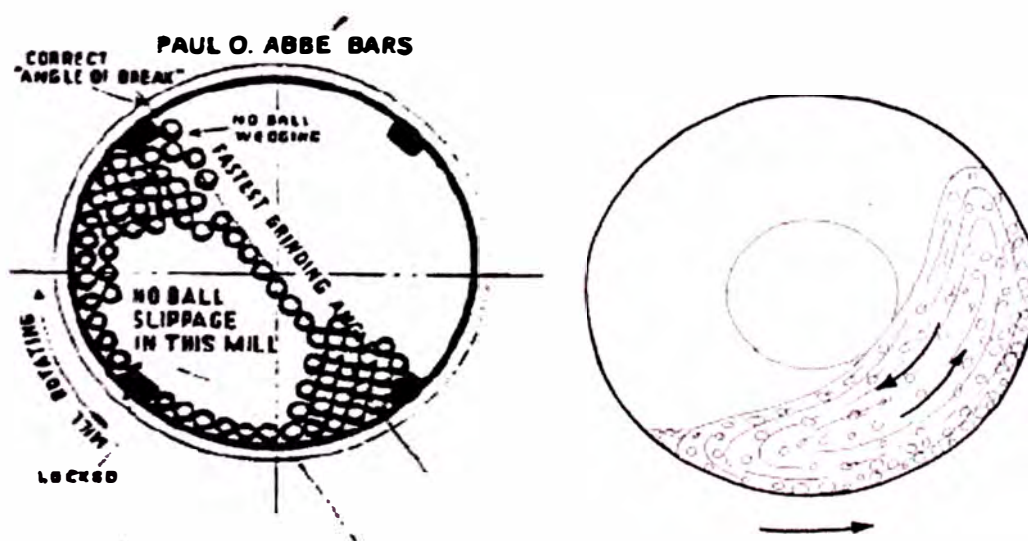
Pero si se considera que la cantidad de molienda hecha está en proporción del número de golpes producido, entonces mientras menor es el tamaño de las bolas, mayor será el efecto moledor, con tal que cada bola, sea lo suficientemente grande para romper las partículas, También puede considerarse que la cantidad de molienda efectuada es proporcional a la superficie que efectivamente tritura, y entonces, mientras menores sean las bolas, mayor será su superficie, para un peso dado de carga, debiendo también en este caso ser la bola de tamaño más pequeño, capaz de efectuar molienda efectiva.

En cuanto el peso total de las bolas que se pone, se acostumbra cargar los molinos con una cantidad de bolas que ocupe un volumen que varía entre 30 y 59% del volumen total del molino.

- **Capacidad con relación a la Velocidad de operación**

Debe estar sujeta en primer lugar al tamaño de la alimentación y al diámetro del molino. El movimiento de las bolas, en un molino que funciona en condiciones correctas, es de dos clases; 1) de rotación alrededor de su propio eje, paralelo al eje del molino y 2) de cascada o de calda libre. La figura representa estos movimientos en un molino trabajando a velocidad adecuada para moler alimentación gruesa. En la parte inferior del molino, las bolas se encuentran en capas concéntricas.

Si la velocidad del molino aumentara, lo suficiente, llegaría un momento en que todas las bolas, permanecerían adheridas al cilindro, por la fuerza centrífuga, sin producir trabajo alguno. La reducción de la velocidad, operada últimamente en los molinos, como consecuencia de experimentos cuidadosos, ha marcado una época importante en las operaciones de estas máquinas. Al principio los molinos de 8 pies se hacían rodar a razón de 22 a 26 r.p.m. La reducción de esta velocidad a 15 o 16 r.p.m. produjo una economía de, un 25 a 33% de Energía, reduciendo prácticamente a la mitad el desgaste de las bolas, disminuyendo el de los forros, todo esto sin afectar visiblemente a la capacidad.



**Fig.3.17: Corte transversal del molino con bolas y material en movimiento**

- **Capacidad con relación a la Forma del Molino (relación Diámetro /longitud)**

El diámetro de un molino de bolas debe determinarse en vista del tamaño de la partícula más grande que se va a moler, mientras que su longitud, debe depender, principalmente, del tamaño de las bolas y la velocidad, son los factores de los cuales depende el poder moledor. Usándose bolas del tamaño común (5 pulgadas máximo), un molino, a una velocidad que permita la caída libre y parabólica de las bolas, debe tener por lo menos tres pies de diámetro para moler partículas de mineral hasta de media pulgada; cinco a seis pies de diámetro cuando el tamaño de estas partículas es de una pulgada y ocho pies cuando el tamaño de estas partículas es de una pulgada y ocho pies cuando la alimentación se admite en trozos hasta de: dos a cuatro pulgadas. La cantidad de grueso o sobre tamaño, que sale en la descarga, se reducirán bastante, cuando se usan molinos de un diámetro mayor que los que acabamos de indicar para la molienda de un determinado tamaño de material. Un aumento en la longitud del cilindro, aumentará también la proporción de material fino contenido en la descarga, pero como al mismo tiempo el consumo de Energía (torque) es también mayor, resulta, que la cantidad de este material fino, producido por HP-hora, en realidad no aumenta, en la mayoría de los casos.

Trabajando en circuito cerrado el resultado de cualquier deficiencia en el diámetro o en la longitud del aparato se traduce en un aumento de la carga circulante, con el siguiente e innecesario aumento en el costo de operación.

- **Capacidad con relación al Consumo de Energía por peso de carga de bolas.**

El consumo de energía es mayor con pulpa fluida que con espesa. Los forros de superficies rugosas, gastan más energía, que los lisos. El consumo de Energía por unidad de peso de carga de bolas es mayor en los molinos grandes que en los pequeños y es también mayor cuando las bolas empleadas, son de varios diámetros, que cuando se usan de diámetro uniforme.

La energía consumida por tonelada de carga de bolas, es algo diferente en los distintos tipos de molinos. En los molinos cilindros de descarga libre estas cifras serían 11.2, 18.9 y promedio 14.1 HP-h/ton. En los molinos de parrilla, las mismas cifras serían 7.2, 21.8 y promedio 13.8 HP-h/ton.

Una parte de la energía consumida, se transforma en una elevación de temperatura de la pulpa que pasa por el molino. Temperaturas tomadas a la entrada y a la salida, demuestran una elevación de 10 a 22 grados centígrados.

### **3.3.8. Parámetros principales que caracterizan a un molino de bolas cilíndrico tubular**

Los principales parámetros son:

#### **a) Velocidad Crítica:**

Es la velocidad de giro mínima alcanzada por el molino, de forma que la fuerza centrífuga creada es suficiente para conseguir que las bolas queden adheridas a los revestimientos del molino.

El valor de la velocidad crítica, para un molino de bolas dado, es:

$$V_{critica} = \frac{42.3}{\sqrt{D_M}} \quad (3.4)$$

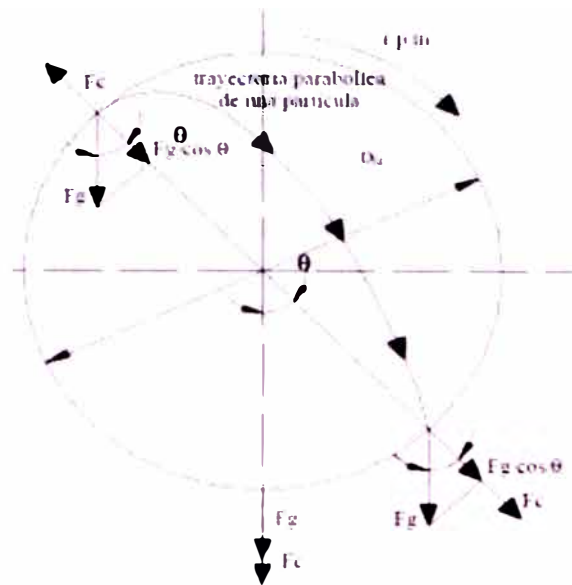
Donde:

V = Velocidad crítica, r.p.m.

$D_M$  = Diámetro del molino, m. (medido entre los revestimientos internos).

Los molinos de bolas suelen trabajar con velocidades comprendidas entre un 72-77 % de la velocidad crítica, dependiendo del diámetro del molino.

La expresión 3.5, ha sido obtenida a través del estudio de la trayectoria seguida por una partícula en el interior de un molino de bolas.



**Fig. 3.18: Trayectoria parabólica de una partícula**

b) Volumen de la Carga de bolas:

Es el volumen que ocupa la carga de bolas en el interior del molino, considerando también los huecos vacíos existentes entre las bolas y viene expresado en tanto por ciento (%) respecto al volumen total interior.

El volumen de carga con el molino en reposo (en vacío) es menor que cuando el molino está girando (en carga) con la misma carga de bolas.

La relación que nos da el volumen de la carga en vacío es la siguiente:

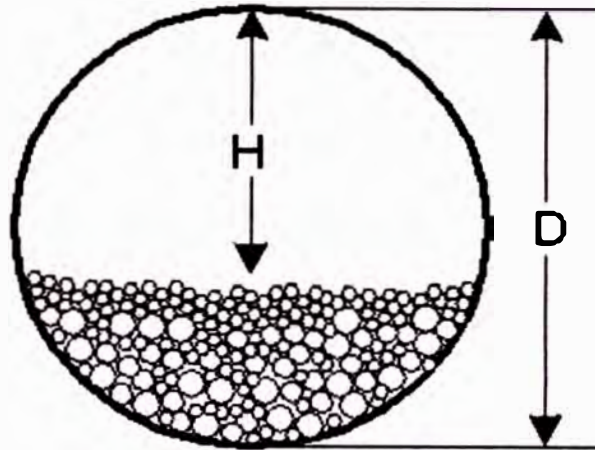
$$VC(\%) = 113 - 126 \frac{H_c}{D_M} \quad (3.5)$$

Siendo:

$H_c$  = Distancia interior máxima entre la parte superior del revestimiento y la parte superior de la carga en reposo.

$D_M$  = Diámetro interior del molino.

Los molinos de bolas trabajan con un grado de llenado comprendido entre un 40-45 % (descarga por rebose) y puede llegar en algunos casos hasta el 50 % (descarga por rejilla).



**Fig. 3.19: Representación de H y D en el Interior del molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41', Nordberg, para molienda fina y húmeda de mineral de hierro:**

c) Tamaño de Alimentación:

El tamaño óptimo de alimentación según Allis Chalmers lo podemos obtener mediante la siguiente expresión:

$$D_{80} = 4000 \sqrt{\frac{13}{w_i}} \quad (3.6)$$

$D_{80}$  = Abertura de la malla por la que pasa el 80 % de la alimentación, en micras ( $\mu\text{m}$ ).

$w_i$  = Índice de Bond; kWh/ton.

d) Tamaño del Producto:

Según Nordberg:

Tamaño máximo producido = 0.420 mm

Tamaño mínimo producido = 10  $\mu\text{m}$ .

Según SIM:

Tamaño de salida  $\rightarrow D_{95} = 30 \mu\text{m}$ .

e) Cociente de reducción:

Según Blanc: La razón de reducción máxima es de 500:1.

Según SIM:

(5-40):1 en circuito cerrado (razón óptima)

100:1 en circuito cerrado (razón máxima)

f) Relación entre el Diámetro y la Longitud:

Puesto que los molinos de bolas no tienen los inconvenientes que presentan los molinos de barras; van a permitir mayor flexibilidad respecto a la relación entre la longitud (L) y el diámetro (D) del molino.

Las relaciones varían desde ligeramente inferiores a 1:1 (L/D):

$$L = 0.9 \cdot D$$

Hasta bastantes mayores de 1:1 (L/D):

$$L = 2 \cdot D \quad \text{o más}$$

### 3.3.9. Método de Seleccionar el Tipo de Molino Necesario

Hiñes sugiere un método ingenioso para escoger el molino de bolas más adaptable a un servicio dado. Después de hacer la determinación más o menos exacta posible del número de toneladas por HP-hora, que se puede esperar obtener en la molienda del material, teniendo en cuenta el tamaño de partícula que se va a alimentar y el que se desea obtener en el producto, se divide por esta cifra el número de toneladas por hora, lo que indicará la Potencia requerida; entonces escójase de las tablas de modelos de molinos de diversos fabricantes. Ejemplo, Si se desea un molino para reducir mineral de dos pulgadas a malla 8 (tamaño del producto), a razón de cinco toneladas por hora. Por datos tomados de la práctica, el número de "toneladas por HP-hora", moliendo desde dos a tres pulgadas a malla 8, es de 0.200. La Potencia requerida será por tanto de  $5/0.200$ , lo que es igual a 25 HP. Esto corresponde a una carga de 36 quintales de bolas, en un molino de emparrillado.

### **3.3.10. Sugerencias para la buena marcha de los Molinos cilíndricos de Bolas**

Tanto el tonelaje como el tamaño de la alimentación, la cantidad de agua de la pulpa y la carga de bolas, deben mantenerse constantes, si se quiere alcanzar el máximo de la eficiencia de la máquina.

Es necesario mantener un control continuo del peso específico de la pulpa, que debe determinarse con frecuencia. Un amperímetro conectado con el motor de la máquina, podrá marcar, cambios relativamente pequeños en el tonelaje de la carga. Una bajada del amperímetro indica o bien disminución de la carga de bolas o bien aumento en el tonelaje o un espesamiento de la pulpa.

Al poner en marcha un molino nuevo, hay que hacerlo andar algún tiempo sin carga alguna, para asegurarse de que su mecanismo está en buenas condiciones. Entonces se para y se carga con las bolas, u otros medios de molienda que se use, y con abundante cantidad de material, de preferencia fino, para impedir fuertes golpes en los forros, cuando se comienza la marcha. Estos golpes podrían ocasionar goteras por los pernos que ajustan las planchas de las corazas o podría romper las bolas o las planchas, si fueran de acero fundido.

Los puntos más importantes a observar al planear la instalación de un molino en circuito cerrado son; la inclinación de los canales, la protección de los motores y engranajes contra las salpicaduras de la pulpa; la adecuada protección de los operarios; especialmente de los alimentadores y de los engranajes y, finalmente, cuidar que haya suficiente espacio en los lados del molino, para los cambios de forros.

Cuando se trata de molinos de descarga libre, trabajando en circuito cerrado con un clasificador, deben tomarse precauciones para impedir que entren a éste, astillas o trozos de madera o las bolas gastadas del molino. Esto puede conseguirse, colocando un cedazo plano y fijo, sobre la caja de descarga del molino o un cedazo circular giratorio en el tubo de descarga.

### **3.4. El molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre o por rebalse natural del mineral;**

Este Molino es un componente del circuito Cerrado de molienda y clasificación de Mineral de hierro (óxido de hierro magnetita  $Fe_3O_4$ , óxido ferroso férrico)

Para la molienda primaria a los molinos de barras se alimenta mineral con 52 a 53 % en peso de agua de mar por su abundancia y bajo costo, manteniéndose la



misma concentración en la pulpa de alimentación para molienda fina y remolienda en este molino cuyos parámetros e índices que caracterizan su funcionamiento se aprecia en la tabla 3.8:

**Tabla 3.8: Parámetros e índices principales que caracterizan el funcionamiento del molino de bolas cilíndrico con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose) del mineral:**

<b>Potencia consumida por el Equipo molino:</b>	3000 HP (2238 kW )
<b>Potencia nominal del motor eléctrico</b>	4000 HP (2984 kW).
<b>RPM operativo</b>	14.75 RPM
<b>Diámetro interior del casco cilíndrico del molino</b>	168 pulg. + ¼ -0 (4.2672 m)
<b>Diámetro interior del cilindro revestido a la altura de forros placas (chaquetas), DM, entre revestimiento.</b>	162 pulg. , (4.115 m.)
<b>Diámetro interior a la altura del lifter (elevador)</b>	156 pulg (3.962 m.)
<b>Espesor del casco cilíndrico del molino</b>	1 pulg.
<b>Angulo de Tapas inclinadas</b>	7.5 °
<b>Diámetro interno de ingreso de la carga</b>	50 pulg.
<b>Diámetro interno de salida de pulpa(descarga por rebose)</b>	42pulg.
<b>Diámetro máximo de bolas</b>	1.1/4 a 1.1/2 pulg.
<b>Velocidad crítica del Molino, según fórmula 3.4.</b>	20.48 RPM
<b>Porcentaje de velocidad crítica</b>	72 %
<b>Alimenta con mineral de hierro(Fe<sub>3</sub> O<sub>4</sub>)</b>	Malla N° 100 al -42%
<b>Salida del producto</b>	Malla N° 325 al 75%.
<b>Capacidad del molino de bolas</b>	117 ton/h primero y luego 100 ton/hora
<b>Volumen de carga ocupado por las bolas</b>	32 %
<b>Motor</b>	Jaula de ardilla de alto torque y bajo RPM:
<b>Transmisión</b>	REDUCTOR DE VELOCIDAD FALK 2850 TCD y eje de transmisión.
<b>Alimentador</b>	Por Manguera.

<b>Eficiencia mecánica del molino</b>	0.045 - 0.052 Ton/kW-h
<b>Consumo de Energía específica (índice de Bond)</b>	22.2 – 19 kW-h /ton
<b>Dureza del mineral de hierro magnetita</b>	19 kW-h /ton
<b>Cantidad de agua de la pulpa</b>	Por informe directo del metalurgista por 1.0 tonelada de mineral se usa 1.10 toneladas de agua en peso de agua.



**Fig. 3.20: Boca de salida del producto del molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41', Nordberg, para molienda fina y húmeda de mineral:**



**Fig.3.21: Motor eléctrico principal, acciona al reductor, de ahí con eje de transmisión de potencia mecánica acciona al molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41', Nordberg, para molienda fina y húmeda de mineral:**

## **CAPITULO IV**

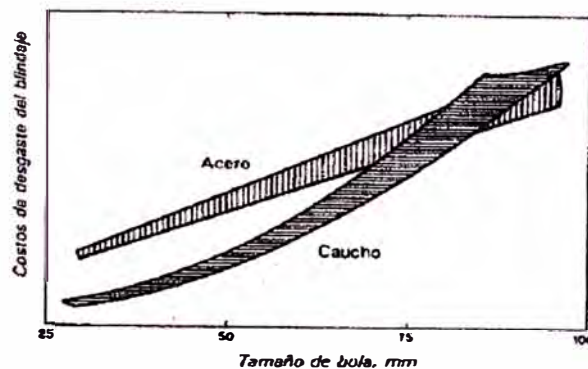
### **4. DISEÑO DE LOS FORROS DE CAUCHO**

#### **4.1. Términos, definiciones y Consideraciones.**

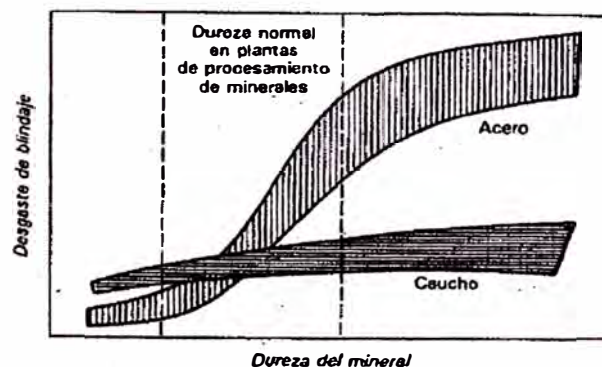
El molino de bolas cilíndrico con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose) del mineral de hierro, tenía blindaje de acero: forros planos y levantadores de onda. Las razones por las que el blindaje de acero se cambia por el de caucho son las siguientes:

- Da Mayor Facilidad y seguridad por el manipuleo de componentes de bajo peso.
- Mejor Sellado hermético
- Su Diseño es fabricado fácilmente a la medida basándose en la optimización de la performance utilizando simulación computarizada.
- Tiene Vida útil larga
- Su empleo da Mejoramiento de la disponibilidad del molino
- Se evita la distorsión de las paredes (Shell) del casco de acero por el impacto de las bolas.
- Brinda Facilidad de la instalación y recambio
- Ocasiona Reducción del nivel de ruido. Los componentes de caucho actúan como amortiguadores y filtro para el ruido.
- Es resistente a los impactos y a la abrasión.
- Proteger el casco del molino contra la corrosión y el desgaste.
- El uso de blindaje de caucho Minimiza el deslizamiento entre los cuerpos molidores y el tambor, favoreciendo un adecuado volteo del mineral.
- Representa un Bajo peso respecto al acero. Un 20 % de éste.

- Menor momento de inercia másico, por lo tanto ocasiona menor consumo de energía.
- Amortigua el ruido causado por el impacto.
- El empleo de caucho es más adecuado para molinos de bolas que traten mineral muy duro (en aquellos casos donde no se sobrepase los 80°C y no entre en contacto con reactivos de flotación).
- Según la experiencia en este tipo de molienda, es conveniente emplear bolas de tamaños comprendidos entre 1.1/4 y 1.1/2, luego según la figura se observa que es ventajoso el empleo del blindaje de caucho porque representa un costo de desgaste 50% menos del costo al emplear blindaje de acero.
- El empleo del blindaje de caucho, cuando se muelen minerales duros, ocasiona menos costo de desgaste que cuando se usa el blindaje de acero.



**Fig.4.1: Comparación de los blindajes de acero y de caucho (cortesía de Skega AB) introducción al procesamiento de minerales-Errol G. Kelñly David J. Spottswood-jhon wiley & sons.Inc. ISBN 0 471-03379-8: Tamaño de bolas vs. Costo del desgaste del blindaje (forro).**



**Fig.4.2: Comparación de los blindajes de acero y de caucho (cortesía de Skega AB) introducción al procesamiento de minerales-Errol G. Kelñly David**

**J. Spottswood-jhon wiley & sons.Inc. ISBN 0 471-03379-8: Dureza del mineral  
Vs. desgaste del blindaje (forros y elevadores).**

**4.2. Parámetros a usar en la selección de los forros de caucho.**

Si se considera mantener la misma capacidad del molino con blindaje de acero para el molino con blindaje de caucho, tanto el volumen como el perfil del blindaje de caucho serán semejantes a los del blindaje de acero.

Actualmente, el interior del casco cilíndrico del molino se blinda con revestimiento de caucho de dos tipos: unos denominados forros placas (forros placas del casco) (Shell plate), los que forman 24 hileras de 481 pulgadas, y otros denominados Elevadores (levantadores) (lifter bar), que también forman 24 hileras de 481 pulgadas, en forma alternada con los forros placas. Las tapas tienen forros planos de forma trapecio circular y los levantadores de las tapas (head lifters) que en conjunto ocupan un menor volumen.

Se analizan los parámetros iniciales más importantes para el diseño del revestimiento de caucho:

**a) De Operación:**

- Velocidad crítica de rotación con la ecuación  $N_c = 20.48$  RPM
- Velocidad de operación  $N_o = 14.75$  RPM
- Porcentaje de reducción respecto a la velocidad crítica:  $14.75/20.48 = 0.72$

**b) Geométricos:**

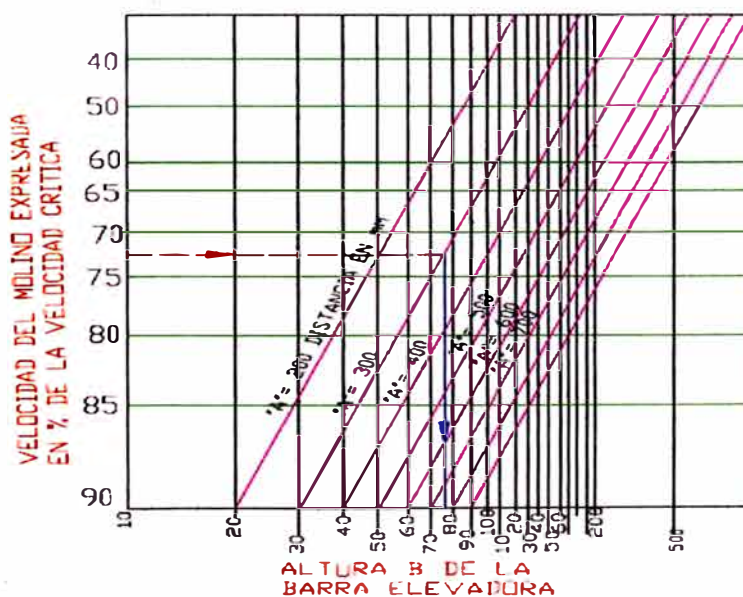
Se miden en el molino:

- LA: longitud del arco entre pernos de sujeción de los forros planos =565 mm.
- C: longitud de la cuerda comprendida del arco interior tomado de referencia del forro de acero anterior, 300 mm, que se toma como A inicial para hallar la medida optima de A del diseño.
- A: Es la cuerda formada entre las bases de dos levantadores adyacentes.
- B: Altura de trabajo de los elevadores (levantadores).

**4.3. Selección de los forros utilizando fórmulas y ábacos.**

- Se ingresa al ábaco de la Fig. 4.3 con 72%
- Se obtiene un B inicial =80 mm.

- Luego se comprueban estas dimensiones iniciales A y B y mediante la relación empírica recomendada por SKEGA (entregada por la compañía Boliden mineral AB):  $A/B = 3- 3.5$  al 75% de la velocidad crítica , que nos permite obtener valores adecuados de A y B para una molienda óptima.
- Observando el grafico 4.4 se puede proyectar para un funcionamiento a un 72% de la velocidad crítica, las curvas de consumo de energía y capacidad serian paralelas y cercanas, no afectando en gran medida el intervalo permitido de A/B, incluso se puede apreciar que este rango puede ser entre 3 a 4(Los consumos mínimos de energía y las capacidades están dentro de este rango)
- Una relación inicial:  $A/B = 300/80 = 3.75$  si cumple.
- Por criterio de fabricación normalmente se trabaja en pulgadas y estos tamaños de altura total van de 4, 5, 6,8 del levantador.
- Considerando no alterar la capacidad del molino se ha considerado mantener el mismo espesor de los forros de acero anteriores, se escoge la altura total de 6 pulgadas para conservar la forma geométrica anterior. Entonces el B definitivo será:  $B = 6 - 3 = 3$  pulg. = 76.2 mm.
- Si se toma un  $A = 298$ mm ,luego la relación  $A/B = 298/76.2 = 3.9$  Esta dentro del rango aceptable.



**Fig. 4.3: Dimensiones del revestimiento (forro): B=altura de trabajo de la barra elevadora, mm (escala log.) y A= Es la cuerda formada entre las bases de dos**

levantadores adyacentes en mm (escala log.) vs N=velocidad de rotación del molino, expresado en porcentaje de la crítica. Fuente Skega AB

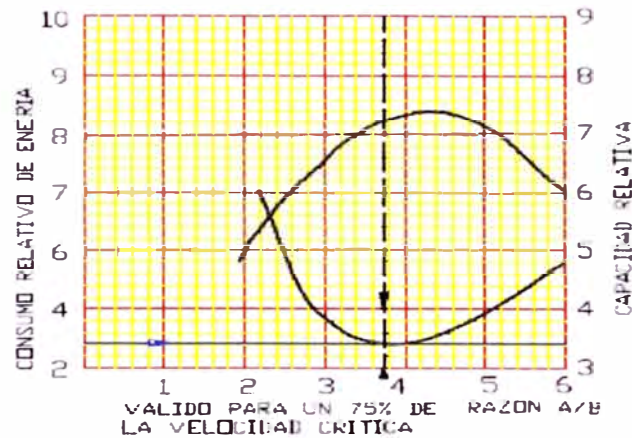


Fig. 4.4: A/B vs. Consumo relativo de energía y Capacidad relativa, válido para el 75% de la velocidad crítica. Fuente Skega AB

4.4. El revestimiento de caucho del molino de bolas cilíndrico con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre del mineral.

El interior del casco cilíndrico del molino se blinda con revestimiento de caucho de dos tipos: unos denominados forros placas (forros placas del casco) (Shell plate), y otros denominados Elevadores (levantadores) (lifter bar). Las tapas tienen forros planos de forma trapecio circular y los levantadores de las tapas (head lifters).



Fig. 4.5: forros placas (forros placas del casco) (Shell plate) y Elevadores (levantadores) (lifter bar) del molino de bolas tipo cilíndrico- tubular de 14'Øx41', Nordberg, para molienda fina y húmeda de mineral:

Los pesos parciales y totales, así como sus dimensiones y volúmenes se muestran en el la siguiente tabla:

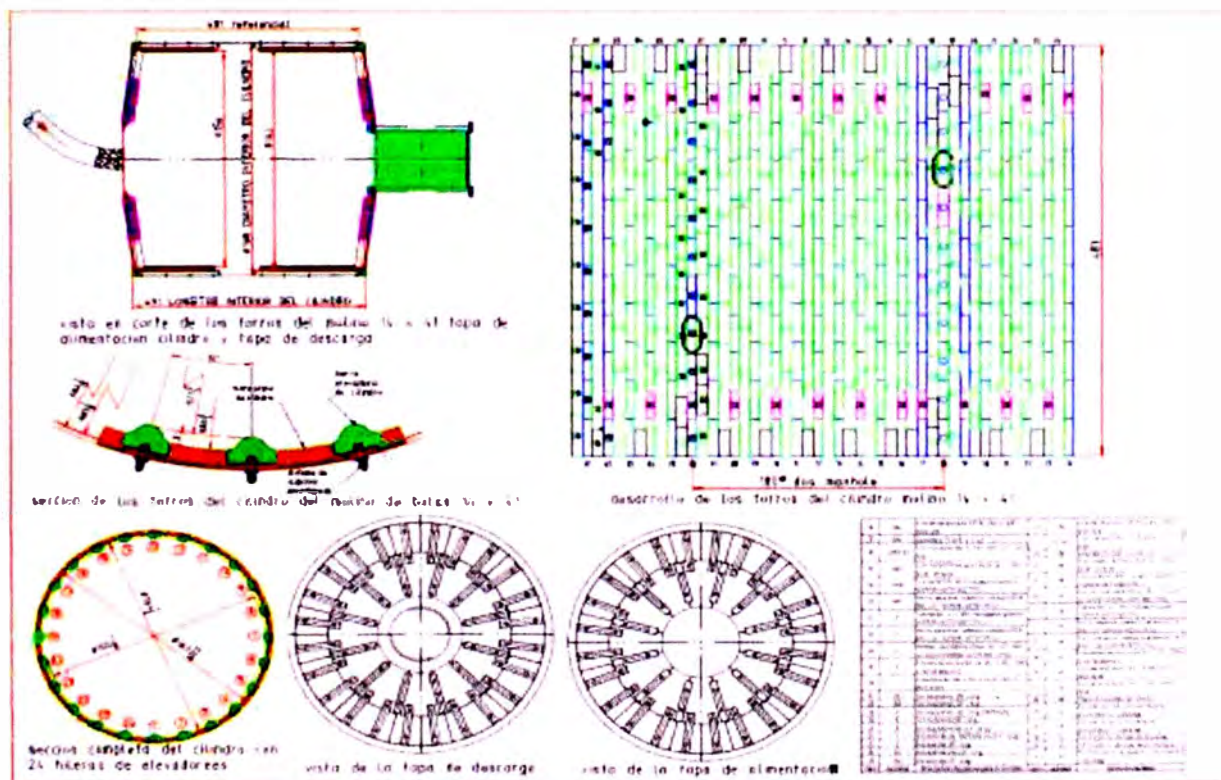
<b>Tabla 4.1: PESOS DE LOS FORROS DE CAUCHO ENVIADOS PARA EL MOLINO 207</b>				
<b>Cilindro</b>				
<b>Barras</b>	<b>longitud</b>	<b>kg caucho</b>	<b>Kg metal</b>	<b>peso total</b>
234 unid	44 7/8 pulg	7605.00 Kg	3159.00 Kg	10764.00 Kg
24 unid	29 1/4 pulg	516.00 Kg	211.00 Kg	727.00 Kg
6 unid	29 15/16 pulg	132.00 Kg	54.00 Kg	186.00 Kg
2 unid	44 7/8 pulg	65.00 Kg	27.00 Kg	92.00 Kg
				11769.00 Kg
<b>Planchas</b>				
<b>Barras</b>	<b>longitud</b>	<b>kg caucho</b>	<b>Kg metal</b>	
204 unid	50 pulg	6222.00 Kg	3142.00 Kg	9364.00 Kg
4 unid	43 pulg	106.00 Kg	53.00 Kg	159.00 Kg
20 unid	28 pulg	350.00 Kg	170.00 Kg	520.00 Kg
8 unid	32 5/16 pulg	160.00 Kg	79.00 Kg	239.00 Kg
8 unid	35 1/4 pulg	176.00 Kg	86.00 Kg	262.00 Kg
				10544.00 Kg
<b>Tapas</b>				
<b>Barras</b>	<b>longitud</b>	<b>kg caucho</b>	<b>Kg metal</b>	
24 unid	29 1/4	300.00 Kg	80.00 Kg	380.00 Kg
48 unid	23 5/32 pulg	602.00 Kg	265.00 Kg	867.00 Kg
				1247.00 Kg
<b>Forros planos exteriores</b>				
24 unid		780.00 Kg	552.00 Kg	1332.00 Kg
				1332.00 Kg
<b>forros planos interiores</b>				
12 unid		372.00 Kg	228.00 Kg	600.00 Kg
12 unid		384.00 Kg	228.00 Kg	612.00 Kg
				1212.00 Kg
<b>Anillo central</b>				
1 unid		91.00 Kg	29.00 Kg	120.00 Kg
				120.00 Kg
<b>Anillo periférico</b>				
2 unid		368.00 Kg		368.00 Kg
				368.00 Kg
<b>PESO OCUPADO POR LOS FORROS INSTALADOS</b>				<b>26592.00 Kg</b>
<b>VOLUMEN OCUPADO POR LOS FORROS INSTALADOS</b>				<b>18.08 m3</b>
<b>VOLUMEN OCUPADO POR LOS FORROS DE ACERO</b>				<b>18.08 m3</b>



<p><b>PESO DE LOS FORROS DE ACERO(BLINDAJE COMPLETO)</b></p>	<p>El peso del acero no se pudo registrar el peso aproximado seria <math>18.08 \text{ m}^3 \times 7.85 \times 0.9 = 127735 \text{ Kg}</math> que al precio de <math>\\$2.2/\text{Kg}</math> seria <math>\\$255470 +</math> instalación + 15 días de trabajos por cambio</p>
<p><b>POR TANTO LA RELACION DE PESO DEL BLINDAJE DE CAUCHO CON RESPECTO AL DE ACERO ES</b></p>	<p><b>20.8 %</b></p>

#### 4.5. Montaje.

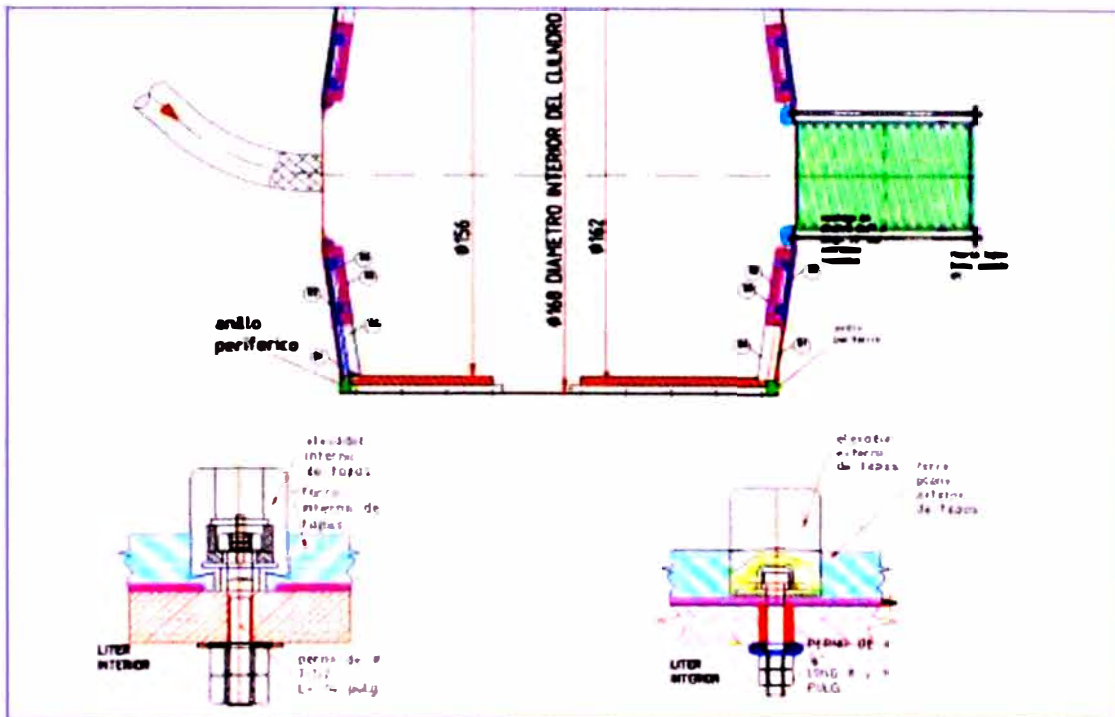
Presentamos un plano del montaje de vista interna general de los forros tanto de las tapas y la distribución de los forros del cilindro con su lista de partes fig 4.6



**Fig.4.6: Plano de montaje de los forros placas, elevadores y forros planos de tapa y elevadores (levantadores) del molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41', Nordberg, para molienda fina y húmeda de mineral:**



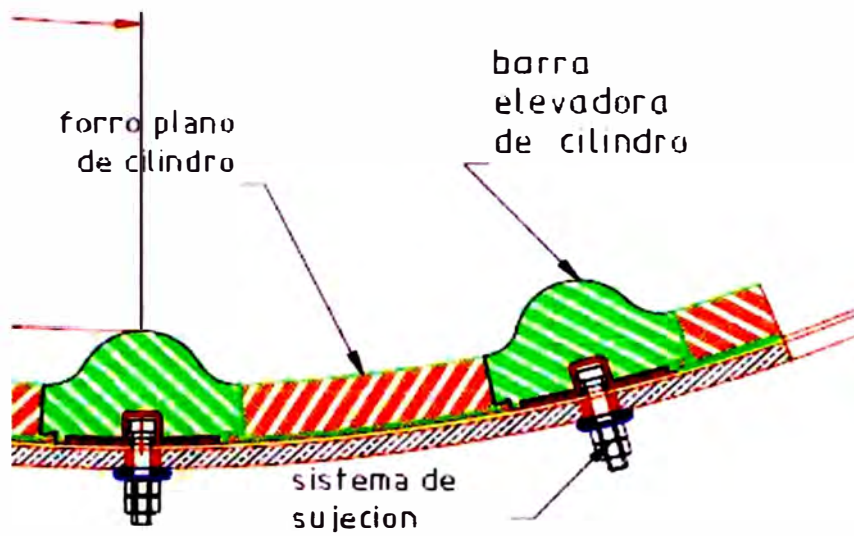
En este grafico Fig. 4.9 se indica de cómo se ensamblan los forros de las tapas y de manera se sujetan con los pernos indicados.



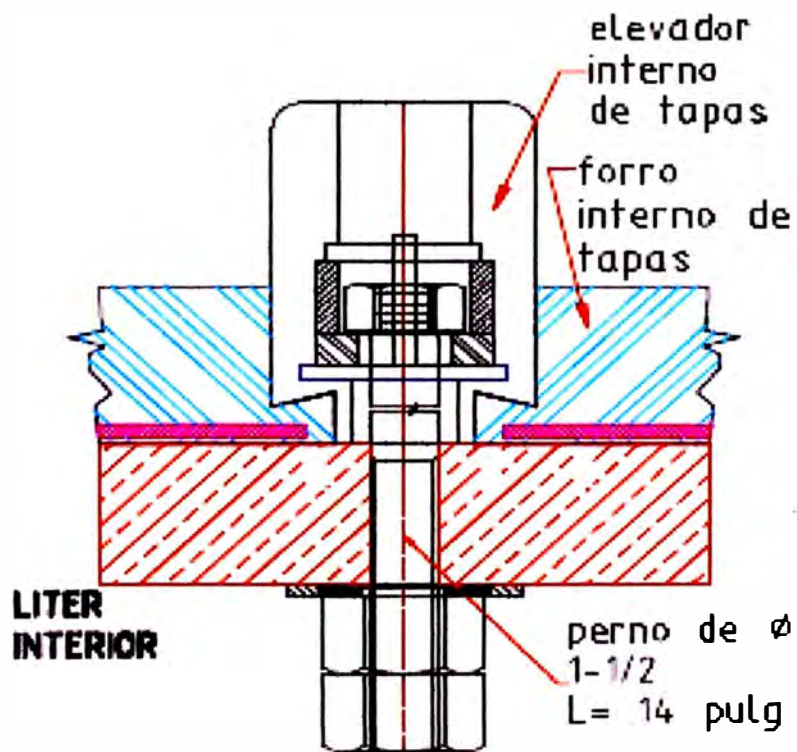
**Fig. 4.9: Perfil de los elevadores y forros planos internos y externos de caucho de las tapas del molino de bolas.**

#### 4.5.1 Sistema de sujeción.

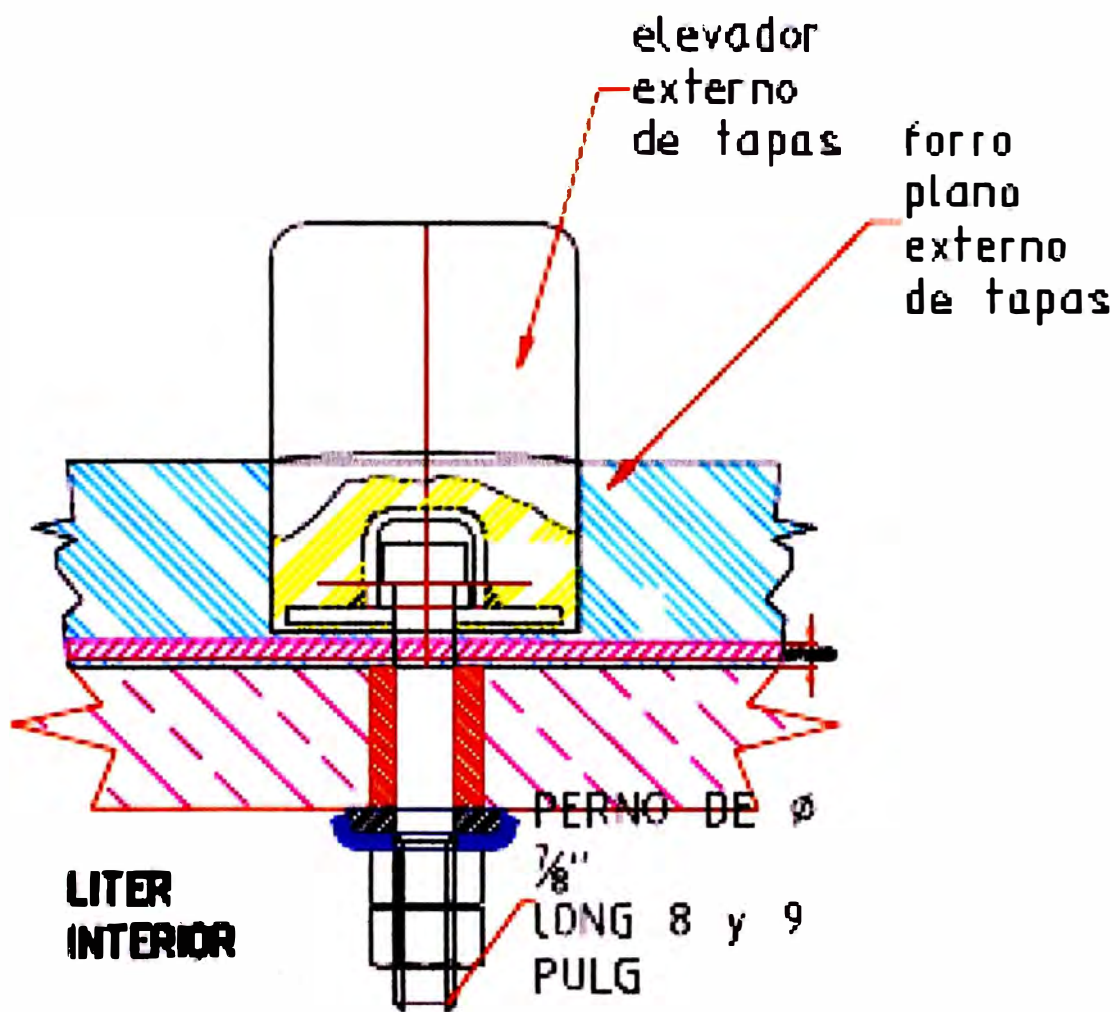
Las planchas y barras elevadoras se sujetan al cuerpo cilíndrico del molino y a las tapas mediante canales U perfil metálico que forman una ranura a lo largo y están incorporados en las barras elevadoras por donde ingresa la placa de metal con la cabeza del perno y se sujetan desde el exterior del molino mediante arandela de caucho, arandela de acero, y tuercas. Gracias a la elasticidad de las partes de caucho y los elementos fijantes, se reducen considerablemente las fuerzas instantáneas de impacto, se hace menos repentino i se absorbe la energía sin destrucción y desgaste innecesario fig 4.10 fig 4.11 y fig4.12



**Fig. 4.10: Sistema de sujeción amortiguado de la barra elevadora y forro placa de caucho del casco del casco cilíndrico.**



**Fig. 4.11: Sistema de sujeción amortiguado de la barra elevadora y forro plano interno de caucho de las tapas del molino.**



**Fig. 4.12: Sistema de sujeción amortiguado de la barra elevadora y forro plano externo de caucho de tapas del molino.**

## CAPITULO V

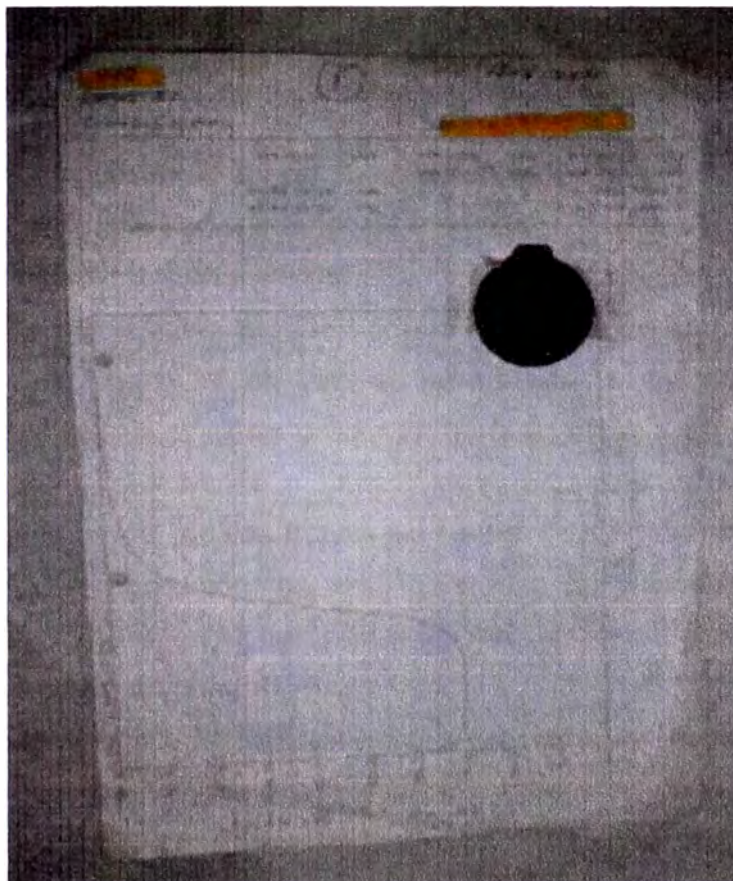
### 5. FABRICACION DEL BLINDAJE DE CAUCHO Y COSTO DE FABRICACION

Los Requerimientos de propiedades mecánicas y químicas del blindaje de caucho del molino de bolas para establecer la fórmula de composición, así como de ingredientes de calidad para su fabricación se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5.1: propiedades mecánicas y químicas del blindaje de caucho del molino de bolas cilíndrico con eje horizontal tubular de 14'Øx41' para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose) del mineral de hierro, requeridos.**

PROPIEDADES	VALORES
Resistencia a la tracción	190 kg/cm <sup>2</sup> +- 10 %
Elongación en la ruptura	630 % +- 10%
Modulo al 300%	67kg/cm <sup>2</sup> + 14%
Dureza	63 +- 3 SHORE A
Color	Negro
Resistencia al desgarró	48 kg/cm <sup>2</sup> +- 10%
Densidad	1.13 kg /dm <sup>3</sup>
Resiliencia	ASTM D2652-74 min 642 Bashore. Cuando el impacto se produce a bajas velocidades, la deformación es elástica, pero podrá dañarse con velocidades superiores a 9 m/s; lo cual equivale a una caída de 4m. Este efecto se aminora con su adecuado sistema de fijación amortiguadora.
Índice de abrasión	Taber -180
Resistencia al calor	Temperatura hasta 70°C, sin cambios apreciables en el caucho. Ocasionalmente puede trabajar hasta 120 °
Resistencia al agua dulce o de mar.	No tiene efecto negativo sobre el caucho
Resistencia al vapor	Si no excede la temperatura indicada, no tiene efecto

	adverso.
Resistencia a los aceites	Los aceites Perjudican a las propiedades físicas del caucho.
Luz solar	Los rayos ultravioleta de la luz solar perjudican al caucho.
Resistencia al ozono	Los motores eléctricos de gran tamaño producen gran cantidad de ozono que es perjudicial para el caucho. La formulación es antiozonante.
Ácidos	Para valores de PH de 1 a 7, el efecto sobre el caucho es despreciable, si la temperatura es inferior a 25°C. Si el fluido tiene dos o más ácidos, se recomienda consultar al laboratorio.
Álcalis	Los álcalis con PH del 7 al 13 ,no afectan al caucho si la temperatura no excede de 25° C.



**Fig. 5.1: Curva reométrica (se obtiene en el Reómetro o Plastómetro). El tiempo vs Torque es útil para garantizar una buena vulcanización y para controlar la calidad de fabricación del caucho formulado para ser moldeado en las matrices de los forros.**

### **5.1. Proceso de fabricación de forros de caucho para el molino 14x41**

Se va a utilizar aproximadamente 27 Ton de caucho, una cantidad de estructuras metálicas y elementos de sujeción:

- Se hace el planeamiento respectivo revisando los planos, y diseñando las matrices respectivas, en nuestro departamento de ingeniería, para los forros, separando los trabajos metalmecánicos (almas metálicas) que se realizarán en maestranza propia y particulares. se compran los pernos a un tercero, en caso de haber piezas fundidas también se encargará su fabricación a los especialistas.
- Se prepara el compuesto de caucho en paquetes de 35 Kg, porque esa es la capacidad de los bambury, con la formulación escogida o seleccionada para los fines que debe cumplir.
- Se traslada el compuesto al bambury, en el cual se inicia el proceso de masticación del caucho y su mezclado con los reforzantes, plastificantes y otros elementos, controlando que no se vulcanice. En este bambury hay un enfriamiento constante por el interior de los rodillos con agua fría que recorre un sistema de enfriamiento (chaquetas).
- Después se Traslada a los molinos abiertos de rodillos donde se terminará la masticación y se entregará en lámina, agregando azufre que es el elemento básico vulcanizante, para darle propiedades mecánicas óptimas al caucho con los acelerantes y retardantes y controlando la temperatura para que no se vulcanice. También los rodillos tienen un sistema de enfriamiento por agua con sus sistema de refrigeración; de aquí se sacan las probetas para realizar el control de calidad para ver el tiempo de vulcanización y todas las otras pruebas ASTM que aseguren su calidad.
- Se separa el compuesto para los diferentes procesos de extruido o pre formado, laminado o calandrado, para vulcanizarlos mediante moldes prensados o autoclave; los cuales tienen su área, personal y su maquinas respectivas: En las prensas con platos calefactores, en las cuales con una presión de 50Kg/cm<sup>2</sup> mín. y temperatura de cerca de 145°C en los platos calefactores se realiza la vulcanización (building, saco Lowell). Esas son las condiciones requeridas para el compuesto de caucho natural.



- Se desmoldan las piezas o se retiran de la autoclave, luego se someten a una inspección de control de calidad, se les da un acabado, y finalmente se controlan las medidas que se indican en el plano.
- Por otro lado los elementos fabricados por otros proveedores especializados tales como pernos, arandelas, sujetadores, tuercas con especificaciones ASTM son controlados con los certificados y las medidas de los planos que se entregan a los proveedores.
- Una vez culminado la fabricación de los forros de caucho, se embalan apropiadamente para ser trasladados a la unidad minera en espera de la programación de instalación, la cual consiste en el retiro de los forros desgastados completos para instalar los nuevos.

## 5.2. Costo de fabricación de los forros de caucho para el molino 14x41

Se indican los costos de fabricación de los componentes del blindaje de caucho del molino de bolas; con el fin de estimar el costo total de fabricación del blindaje de caucho.

Los costos indirectos de fabricación, que dependen del tipo y capacidad de la fábrica, se tomaron de la empresa Reymosa S.A.

El costo de la mano de obra directa toma en cuenta también el uso de las máquinas, equipos y herramientas. A continuación se presenta el listado de costos de los componentes del blindaje completo de caucho del molino de bolas, y su comparación con el costo del blindaje de acero e indicando el resultado de este análisis.

**Tabla 7.1: Costos totales finales de fabricación de los componentes del revestimiento de caucho del molino de bolas cilíndrico con eje horizontal tubular de 14'Øx41'para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose) del mineral:**

DESCRIPCION		CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Elevadores de cilindro 44-7/8	01	234 UNID	\$247.44	\$57,901
Elevadores de cilindro 29-1/4	02	24 UNID	\$157.07	\$3,770
Elevadores de cilindro 29-15/16	03	6 UNID	\$172.13	\$1,033
Elevadores de cilindro manhole	04	2 UNID	\$256.05	\$512
Elevadores exteriores de tapas	05	48 UNID	\$64.55	\$3,098

Elevador de interior de tapas	06	24 UNID	\$135.55	\$3,253
Anillo periférico (segmento de relleno)	07	22 UNID	\$129.10	\$2,840
Tapón de jebe para elevador interior de tapas		48 UNID	\$10.76	\$516
Sujetador de pernos PI 3/8x1-5/16x4		860 UNID	\$3.87	\$3,331
Perno cabeza cuadrada 7/8 long 5		770 UNID	\$4.09	\$3,148
Tuerca pesada hexagonal 7/8		1728 UNID	\$1.72	\$2,974
Arandela DE= 2-5/16 X DI=15/16 E= 1/8		1728 UNID	\$1.72	\$2,974
Arandela de caucho DE= 2-3/8 E= 3/8		860 UNID	\$0.86	\$740
Perno de 1-1/2 X L= 13		52 UNID	\$43.46	\$2,260
Perno cabeza cuadrada 7/8 long 8		28 UNID	\$6.45	\$181
Arandela de acero DI= 1-9/16		52 UNID	\$4.30	\$224
Tuerca hex pesada de 1-1/2		52 UNID	\$8.28	\$431
Perno cabeza cuadrada 7/8 long 9		48 UNID	\$7.32	\$351
Arandela de jebe de DE= 2-15/16 DI= 1-9/16 E= 1/4		24 UNID	\$1.29	\$31
Anillo PI de 3/16 x DI= 3 DE=4		24 UNID	\$2.15	\$52
Tuerca pesada hex de Dia= 1"		8 UNID	\$2.58	\$21
Tuerca tapon pesda hex		8 UNID	\$3.87	\$31
Vastago de amarre DIA 1" xL=70" rosacdo en extremos		8 UNID	\$98.98	\$792
Forros planos de cilindro L=32-5/16"	08	8 UNID	\$193.65	\$1,549
Forros planos de cilindro L=35-1/4"	09	8 UNID	\$178.59	\$1,429
Forros planos de cilindro L=43" manhole	10	4 UNID	\$215.17	\$861
Forros planos de cilindro L=50"	11	204 UNID	\$251.74	\$51,356
Forros planos de cilindro L=20"	12	20 UNID	\$167.83	\$3,357
Forro exterior de tapas 30°	13	24 UNID	\$393.75	\$9,450
Forro interior de tapa de alimentación	14	12 UNID	\$344.27	\$4,131
Forro interior de tapa de descarga	15	12 UNID	\$361.48	\$4,338
Forro caracol	16	1 UNID	\$2,065.59	\$2,066
<b>Costo total del blindaje de caucho para dos años</b>				<b>\$169,000</b>
<b>Costo total del juego completo de elevadores de cilindro para Reemplazo en la mitad de la vida (cada año aproximadamente)</b>				<b>\$ 69,517.00</b>
<b>Costo total del blindaje y juego completo de elevadores de cilindro para reemplazo que duran aproximadamente 02 años</b>				<b>\$ 238,517.00</b>
<b>Costo de 127735 kg de blindaje total de acero (\$2.2 / kg)</b>				<b>\$281,017.00</b>
<b>En dos años se hacen 03 cambios de blindaje de acero por tanto el costo total en dos años de vida será</b>				<b>\$843,05.00</b>
<b>Ahorro por emplear blindaje de caucho en dos años sera</b>				<b>\$604,534.00</b>
<b>Ahorro por emplear blindaje de caucho en un año sera</b>				<b>\$302,267.00</b>

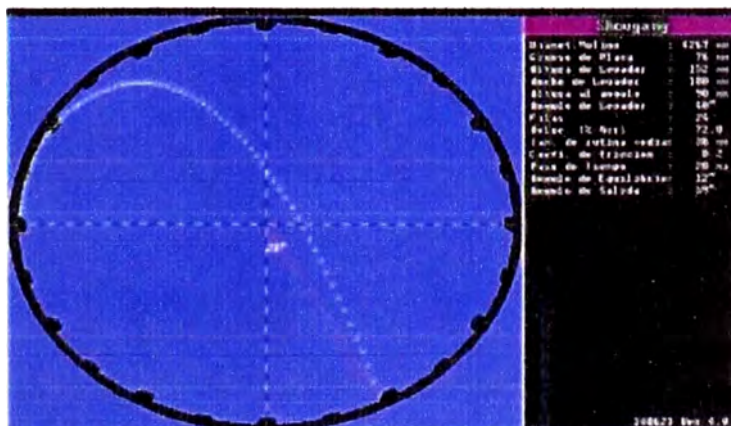
## CAPITULO VI

### 6. EVALUACION DE LA APLICACIÓN DEL FORRADO DE CAUCHO

#### 6.1. Influencia del revestimiento de caucho sobre la capacidad, eficiencia y economía de molienda

Los datos operacionales del molino indican que la capacidad no disminuye con su revestimiento de caucho, si se elige el diseño correcto. Donde se ha observado una reducción se ha debido a la falta de conocimiento en etapas iniciales del diseño de revestimiento de caucho, o a causa de restricciones en medios para adaptar las condiciones de dichos revestimientos.

En el molino de bolas cilíndrico con eje horizontal tubular de 14'Øx41'X1" para molienda fina y húmeda, de descarga libre (por rebalse natural, rebose) del mineral de hierro, se realiza molienda fina en su mayor parte por el mecanismo de rozamiento y abrasión que por impacto, la velocidad de operación es 72 % de la velocidad crítica, es menor que el 75% de la velocidad crítica, prácticamente no se produce catarata en la carga de molienda, tal como se muestra en la Fig. 6.1, obtenida del simulador.



**Fig.6.1: Máxima parábola de caída de la carga en el molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41', Nordberg, para molienda fina y húmeda de mineral:**

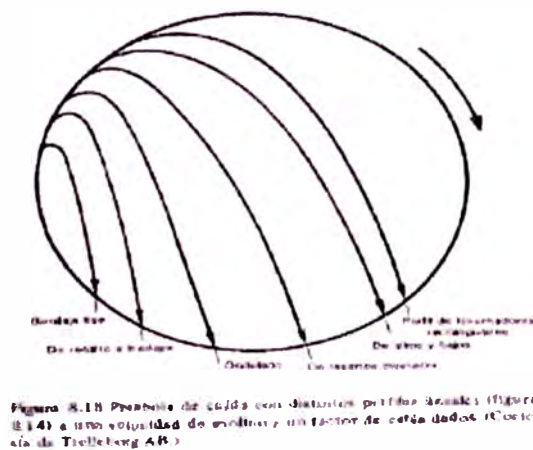
Influye mucho el grosor del revestimiento. Se sabe que la capacidad es proporcional al diámetro interno del molino blindado, elevado a 2.6 (OK.D2.6). Según esta relación un molino de 2,4 m, de diámetro, cada 25 mm de grosor del revestimiento resultará en una reducción de la capacidad en más del 5%.

Un revestimiento de caucho que este bien diseñado dará como mínimo la misma capacidad que cualquier otro revestimiento, El revestimiento de caucho puede hacerse más delgado que otros tipos de revestimientos y, en estos casos, el mayor diámetro libre del molino resultara en una mayor capacidad. En el presente molino se ha empleado el mismo diámetro interno del revestimiento de acero, anteriormente empleado.

**6.2. Influencia de la separación y altura de las barras y de la velocidad de rotación en la capacidad y eficiencia.**

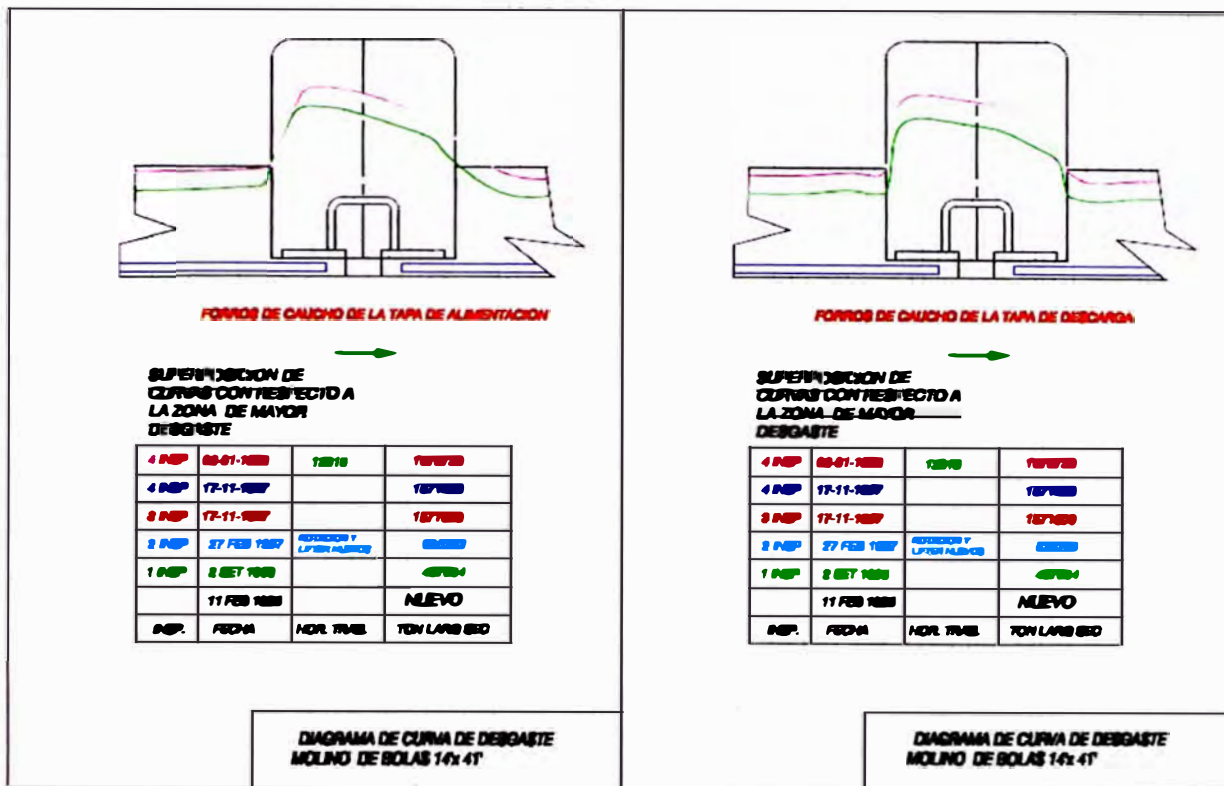
Los resultados experimentales indican que se obtiene la óptima capacidad y eficiencia de molienda con determinadas razones de separación /altura de las barras elevadoras. Seleccionando la razón  $A/B = 3 - 4$  (figura 4.4), se lograrán condiciones óptimas en cuanto al desgaste de las barras, a una velocidad de rotación de 75% de la crítica.

La molienda puede variarse cambiando la altura y el perfil de la barra elevadora (levantadora).En el presente caso prácticamente no se ha variado ni la altura ni el perfil de la barra elevadora de acero. Por lo tanto se ha tratado de mantener la capacidad y eficiencia anterior.



**Fig. 6.3: Parábolas límites máximas de caída de la carga con distintos tipos de perfiles lineales de elevadores (levantadores) de caucho en un molino de bolas cilíndrico tubular.**





**Fig. 6.5: Diagrama de la curva de desgaste de los forros planos y barras elevadoras de las tapa de alimentación y de descarga del molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41', para molienda fina y húmeda de mineral:**

### 6.3.2. Consideraciones iniciales para el cálculo de desgaste de los forros

El desgaste del revestimiento de acero o de caucho depende en primer término del material de construcción de estas piezas, y después de la dureza de la mena a moler (clase de mineral). Luego depende del tamaño en que se alimenta o se descarga la mena. El desgaste es mayor cuando el tamaño del material que entra al molino, es menor, pues entonces la separación, toma también más tiempo. El desgaste aumenta con la rapidez del molino (velocidad de rotación) y con la cantidad de agua de la pulpa (consistencia de la pulpa), aumenta también cuando se muele en circuito abierto. También depende de la posición del forro placa, tonelaje, y peso de la carga de bolas.

La duración de los forros varia de cuatro meses a tres años, pero en término medio, puede calcularse en seis meses. El consumo de los forros de acero al manganeso, que es el más comúnmente usado, puede estimarse en 0.35 de libra por tonelada, cuando se muele a una finura de malla seis a malla 20, principalmente

en circuito abierto, y en 0.50 de libra por tonelada, moliendo en circuito cerrado al tamaño requerido para la flotación común. Los forros de acero al cromo, son más resistentes y a juzgar por los datos suministrados, por algunas plantas de molienda, el desgaste es de 0.18 libras por tonelada en molienda gruesa y 0.39 libras por tonelada en molienda fina. Tratándose de forros de acero fundido el consumo puede llegar a 0,7 libras por tonelada.

El revestimiento de caucho del molino en estudio, en el interior del casco cilíndrico, está integrado por dos tipos: unos denominados forros placas (SHELL PLATE), los que forman 24 hileras de 481 pulgadas, y los otros Elevadores (levantadores) (lifter bar), que también forman 24 hileras de 481 pulgadas. Como el forro placa no se desgasta en forma uniforme, sino en forma de cuña en el sentido de la rotación, según diagramas de desgaste, a la mitad de la vida útil de este forro se gira y de esa forma se obtiene un perfil de forro placa gastada de espesor final algo uniforme.

Según la experiencia adquirida en este tipo de blindaje de caucho para el mineral de hierro, en la mitad de la vida de un forro placa deben reemplazarse todos las barras levantadoras, ya que estas se encuentran muy gastados, tal como se muestra en la curva de desgaste de la Fig. 6.4, es decir que en un ciclo de vida útil del forro total del molino han participado 24 hileras de forros placas y  $2 \times 24 = 48$  hileras de barras levantadoras.

Luego, se analiza el diagrama de curvas de desgaste de los forros placas y barras levantadoras con desgaste crítico, los cuales fueron tomados como muestras representativas, para el cambio de los levantadores y giro de los forros placas. Los perfiles de forros gastados se midieron con un peine especial para estos casos y se dibujaron a escala con el software autocad en un plano: curvas de desgaste. En la mitad de vida del revestimiento en general, antes de girar los forros planos, se miden las áreas de la zonas gastadas de los perfiles de los forros planos críticos ( $10.86 \text{ pulg}^2$ ) (lo que representa en promedio un desgaste de 22mm) y de las barras levantadoras críticas ( $18 \text{ pulg}^2$ ) (muy gastado).

Según curvas de desgaste del plano de la figura 6.4: el área de desgaste promedio entre los de máximo y mínimo desgaste del perfil para los forros placa es  $6.83 \text{ pulg}^2$  y de  $11.37 \text{ pulg}^2$  para las barras elevadoras. Luego, si se desprecia el desgaste del blindaje de las tapas, el volumen de caucho desgastado en promedio en un ciclo de vida útil del blindaje de caucho es:

$$(6.83 \times 481 \times 24) \times 2 + (11.37 \times 481 \times 24) \times 2 = 2 \times (6.83 + 11.37) \times (481 \times 24) = 420201.6 \text{ pulg}^3$$

$$420201.6 (0.254 \text{ dm})^3 = 6886.5 \text{ dm}^3 = 6.886 \text{ m}^3$$

Con una densidad del caucho de  $1.25 \text{ kg/dm}^3$ , el peso en kg es:

$$6886.5 \text{ dm}^3 \times 1.25 \text{ kg/dm}^3 = 8609 \text{ kg} = 18939 \text{ lb.}$$

Según experiencia adquirida y datos de operación en este tipo de molino: En la actualidad el blindaje de caucho está durando de 1 600 000 a 2 000 000 de toneladas procesadas. Luego, en un ciclo de vida del revestimiento de caucho se considera en promedio que pasa 1 800 000 ton de mineral.

Luego el índice de desgaste del revestimiento de caucho en  $\text{dm}^3$  por ton será:

$$6886.5 \text{ dm}^3 / 1\,800\,000 \text{ ton} = 0.004 \text{ dm}^3/\text{ton.}$$

Considerando, como una primera tentativa de estimado, datos de fuentes especializadas en molinos, es decir, que aproximadamente el desgaste que experimenta el blindaje de acero es de  $0.35 \text{ lb/ton} = 0.177 \text{ kg/ton}$ . Luego, Si la densidad promedio del acero al cromo es  $7.8 \text{ kg/dm}^3$ , Se tendrá un desgaste volumétrico de:

$$(0.177 \text{ kg/ton}) / (7.8 \text{ kg/dm}^3) = 0.0227 \text{ dm}^3/\text{ton.}$$

Comparando los índices de desgaste de caucho y acero al cromo, respectivamente:

$$0.004 \text{ dm}^3/\text{ton.} < 0.023 \text{ dm}^3/\text{ton.}$$

El blindaje de acero al cromo se desgata  $0.023/0.004 = 5.7$  veces más Rápido que el caucho. Según reportes de mantenimiento realizado en el molino en estudio, El tiempo promedio de duración del blindaje de acero (cuando se para de operar y se realiza el reemplazo) es de 7 meses, luego el tiempo que transcurre para realizar el primer reemplazo de los lifters (levantadores) del casco cilíndrico y girar los forros placas de caucho es prácticamente cada año.



### **6.6.3. Influencia del desgaste en la capacidad y calidad de molienda.**

En 2 años el molino blindado con acero parara 3 veces para el reemplazo completo de su blindaje (dura 20 días), mientras que el molino blindado con caucho parara 2 veces, la primera parada es para reemplazo solo de las barras elevadoras de los cilindros (dura 3 días), y la segunda para el reemplazo completo (dura 4 días). El periodo de paralización total en dos años se reducirá en un promedio de:  $3 \times 20 - (4 + 3) = 53$  días. Luego el período de paralización total en un año se reducirá en un promedio de: 27 días.

Con estas acciones de mantenimiento y reemplazos, monitoreando los desgastes críticos, se logra mantener la eficiencia de molienda y la capacidad constante y con una reducción del periodo de paralización de 27 días al año se incrementa la producción y disminuye el gasto de mantenimiento.

### **6.4. Amortiguación del ruido**

En todas las industrias se está prestando hoy cada vez más atención al problema de la contaminación acústica, ya que en muchos países la legislación exige una protección eficaz de los empleados contra los efectos de una exposición a ruidos excesivos.

Toda reducción del nivel de ruido es de gran importancia, por ser evidente que incluso un lapso relativamente breve de exposición a ruidos fuertes puede causar daños permanentes.

Las vibraciones causadas por el impacto del blindaje de caucho del molino son menores, y se producen menos ruidos, porque el caucho es más silencioso que el acero ya que el caucho tiene grandes pérdidas internas. Los materiales que emiten sonidos tales como el acero, tienen una pequeña cantidad de pérdidas internas. El blindaje del molino que está sometido a golpes y vibraciones debe hacerse por tanto con material que tengan grandes pérdidas internas (absorber energía y transformarlo en calor).

El ruido acompaña a la abrasión. El caucho amortigua eficazmente el ruido, genera menos ruido que otros materiales de revestimiento y es muy resistente a la abrasión. En consecuencia, la aplicación del revestimiento de caucho adecuado resuelve los problemas tanto del ruido como de abrasión, reduciendo el desgaste y eliminando la causa del ruido, como es el contacto de sólidos con metal.

### **6.5. Costos de instalación, recambio y tiempos improductivos**

El caucho tiene varias propiedades que le dan una clara ventaja sobre el acero, como material resistente a la abrasión. El caucho es más liviano que el acero, lo cual facilita la instalación y manipulación del revestimiento. Cuando se cambia el revestimiento de acero por el de caucho, puede ser que la instalación inicial demore un poco más, si hay que abrirle nuevos orificios al molino o si el personal instalador no está debidamente adiestrado. Pero en condiciones normales, para revestir un molino con caucho se tarda entre la quinta y la cuarta parte del tiempo requerido para revestido con acero. El caucho no se oxida y es fácil de trabajar. Su instalación exige un mínimo de herramientas.

El blindaje de caucho del molino exige un mínimo de supervisión y reparaciones. Los molinos con blindaje de acero suelen requerir inspecciones y reparaciones frecuentes, así como un control periódico del apriete de los pernos, con el revestimiento de caucho una vez comprobados los pernos después de la puesta en servicio no se requiere más mantenimiento.

Se observa entonces que hay un efecto en la economía general de molienda por la aplicación del revestimiento de caucho. Como resultado del menor tiempo de instalación y recambios, así como la duración generalmente mayor de un blindaje de caucho, se reducen los tiempos improductivos (27 días al año).

El costo de una hora de parada del molino es:  $24.9 \times 100 = 2490$  dólares USA. Un 10% de reducción del tiempo improductivo del molino ( $27 \times 24 = 648$  horas), es decir, unas 64.8 horas por año, representa por tanto a una suma de dinero ( $64.8 \times 2490 = 161352$  dólares USA) que supera al gasto anual del revestimiento ( $238\ 517.00 / 2 = 119\ 258$  dólares USA).

El periodo de paralización del trabajo del molino se ha reducido en 648 horas por año al utilizarse los revestimientos de caucho.

### **6.6. Determinación del ahorro por aplicación del blindaje de caucho en el molino de bolas.**

Para determinar el ahorro se deben comparar los costos totales de los años anteriores cuando se usaba blindaje de acero con los actuales por el empleo de blindaje de caucho.

El beneficio para la empresa por la aplicación del caucho, está en la reducción del costo de mantenimiento durante los últimos años pasados, por el

menor costo anual del blindaje de caucho y menos tiempo de mano de obra empleado; y sobre todo, en la disminución del tiempo de parada ,ya que la pérdida de utilidad por venta del mineral concentrado, cuando el molino de la planta de molienda fina no produce dicho producto, es:  $2490 \times 24 = 59\ 760$  dólares USA/día, según informe (apéndice).

Para poder evaluar la viabilidad económica hay que hacer una estimación en cuanto al aumento del rendimiento en relación con el coste del blindaje de caucho, teniendo en consideración el coste total de molienda.

Según informe de tonelaje de producción anual, se considera un promedio de 5'373,951 toneladas al año y según informe de ventas se consideró 374 763 957 millones de nuevos soles. Luego el precio de venta de cada tonelada de mineral concentrado es  $374\ 763\ 957/5'373,951 = 69.74$  Nuevos soles. Luego  $69.74/2.8 = 24.9$  dólares USA/ Ton. El molino produce 100 toneladas por hora, en un día 2400 ton/h

- a) Ahorro por reducción del tiempo improductivo (días de parada) anual al reemplazar el blindaje de caucho:  $2400 \times 27 \times 24.9 = 1\ 613\ 520$  dólares USA al año.
- b) Ahorro de dinero por reducción del gasto anual del blindaje de caucho (disminución del costo de mantenimiento): 302,267.00 dólares USA al año.
- c) Ahorro de dinero por reducción de energía consumida anual por emplear blindaje de caucho.

El revestimiento de acero se puede considerar como un anillo de diámetro interior  $D_i = 4.115$  m y diámetro exterior  $D_e = 4.2672$  m y tiene un peso total de 127735 Kg, luego la energía cinética de este anillo que está rotando a 14.75 RPM, se calcula mediante la siguiente relación:  $E_c = (I_m w^2)/2$

- $I_m$ : momento de inercia de masa del anillo =  $m (R_e^2 - R_i^2)/2 = 127735(2.134^2 - 2.057^2)/2 = 20610$  kgm<sup>2</sup>
- $W$ : velocidad angular de rotación =  $14.75 \times 2\pi/60 = 1.54$  rad/s

La energía cinética del anillo de acero será:  $(20610 \times 1.54^2)/2 = 24\ 439$  Nm

La energía cinética del anillo de caucho será:  $((26592/127735) \times 20610 \times 1.54^2)/2 = 5\ 088$  Nm

Luego la diferencia de energía cinética =  $24\ 439 - 5088 = 19\ 351$  Nm. Se necesita menos torque para hacer girar el revestimiento de caucho, lo cual ahorra en potencia =  $19\ 351 \times 1.54 = 29\ 800$  w = 29.8 Kw

Al año se ahorra:  $8000 \times 29.8 = 238\,404$  Kw-h.

Hay un ahorro de:  $238\,404 \times 0.16 = 38\,145$  nuevos soles =  $13\,623$  dólares USA

### **Ahorro al año**

$1\,613\,520 + 302\,267.00 + 13\,623 = 1\,929\,410$  dólares USA

### **Ahorro neto al año**

$1\,929\,410 - 119\,258 = 1\,810\,152$  dólares USA

## **6.7. Evaluación costo beneficio**

La evaluación costo beneficio de la implementación del mantenimiento predictivo se realiza con los siguientes indicadores.

Retorno de la Inversión

Periodo de Devolución

### **6.7.1. Retorno de la Inversión (ROÍ)**

Este indicador determina el valor económico que recibe la empresa por la inversión en la implementación del blindaje de caucho en el molino.

$$\text{ROÍ} = (\text{Ahorro/Inversión}) \times 100$$

$$\text{ROÍ} = (1\,810\,152 / 119\,258) \times 100$$

$$\text{ROÍ} = 1518 \%$$

### **6.7.2. Periodo de Devolución**

Periodo de Devolución = Inversión/Ahorro Anual.

Periodo de Devolución =  $119\,258 / 1\,810\,152 = 0.066$  años.

## **CONCLUSIONES**

El diseño, fabricación y empleo de forrado de caucho para el molino de bolas cilíndrico tubular de 14'Øx41', para molienda fina y húmeda, de descarga libre o por rebalse natural del mineral de hierro de la planta magnética, brinda ventajas técnicas y económicas en comparación con el forrado de acero que se empleaba en los inicios de su operación:

- Vida útil larga (Incremento en la duración), el blindaje de caucho es resistente al desgaste tres a cinco veces más que el de acero.
- Los lifter de acero, con una vida útil de cerca del 60% con respecto a los de caucho experimentaban una pérdida importante en la capacidad de levante.
- Se evita la distorsión de las tapas y del casco cilíndrico por el impacto de las bolas aplicando forros de caucho.
- Ya no se produce el forjado entre el forro de acero y perno, por lo que no se requiere oxicorte y/o el uso de discos de corte para desmontar los forros, por lo tanto con la aplicación del forrado de caucho se reduce el tiempo de desmontaje.
- El mejor Sellado hermético de los forros de caucho evita también el crecimiento de grietas del casco cilíndrico y tapas por corrosión causado por el agua salada que se emplea para la remolienda.
- Por ser reducido el peso del forrado de caucho ocasiona:

1. Alivio de sollicitación de esfuerzos en los descansos (muñones) del molino.
  2. Limitación del crecimiento de grietas del cilindro y tapas.
  3. Utilización de esta reducción de peso en aumento de carga de bolas (previa evaluación mecánica) o si se mantiene la misma capacidad habrá disminución del consumo de energía.
  4. Menor riesgo de accidentabilidad por la facilidad y seguridad en el manipuleo de componentes de bajo peso.
- Los forros de caucho actúan como amortiguadores y filtros para el ruido.
  - Este estudio muestra una aplicación real y concreta de lo aprendido en los trabajos asignados y sobre todo en la experiencia adquirida en el metrado de los molinos de bolas, diseño, fabricación, instalación y reemplazos del blindaje de caucho natural, apoyados por conocimientos adquiridos en los estudios de pregrado en la Universidad Nacional de Ingeniería.
  - Mediante un conjunto de relaciones empíricas, ábacos, recursos matemáticos, teorías y metodologías basadas en la observación de los datos de las mediciones del desgaste y el tonelaje, probadas y efectivas a nivel tecnológico se diseña, fabrica e instala el forrado de caucho.
  - El mejor rendimiento se logra con un diseño de revestimientos Lifter tipo ondulado con coraza tipo placa cilíndrica, con las mismas dimensiones interiores, que transmite prácticamente la misma energía a las bolas y un consumo de potencia ligeramente menor, con la ventaja de dar mayor duración. Esta condición mejora cuando el diámetro máximo de bolas es de 1.1/4".
  - Este trabajo demandó el conocimiento y aprendizaje de lo más básico de mecanización de minerales, características de operación de molinos de molienda fina, y un estudio tecnológico y científico del caucho; lo que tomo el 75% del tiempo de realización de este trabajo.

- La aplicación del forrado de caucho aumenta la disponibilidad anual del molino, porque éste está compuesto de menor número de piezas, de mayor tamaño y de menor peso, de tal modo que, el desmontaje y montaje en promedio (facilidad de la instalación y recambio) requieren menor cantidad de movimientos y por lo tanto reducción de tiempo de montaje, 27 días menos de paralización por año respecto al acero.
- El blindaje de caucho entrega un mejor costo beneficio para la minería en comparación con el de acero. Reemplazar el blindaje de acero por el de caucho es ventajoso porque la inversión se recupera prácticamente en un mes.
- Este Informe representa una innovación tecnológica de fácil implementación. Con lo que se logra la factibilidad técnica de la solución propuesta.
- La experiencia en este campo permite contrastar la duración y rendimientos productivos que ofrecen los proveedores y fabricantes de revestimientos, con los datos reales percibidos en la planta.

## **RECOMENDACIONES**

- **Es necesario seguir experimentando científicamente el empleo del blindaje de caucho.**
- **El diseño debe estar basado en la optimización de la performance utilizando simulación computarizada.**
- **Se debe optimizar el movimiento de la carga de los molinos de bolas para molienda fina y remolienda, mediante el correcto diseño de los forros y sus interacciones con la velocidad de giro y/o los medios de molienda**
- **Lograr la optimización del consumo de energía, duración de los forros y medios de molienda, y una mayor capacidad de tratamiento (potencial de optimización de las simulaciones en 2 dimensiones).**
- **Se debe lograr un punto óptimo de equilibrio entre la eficiencia de la carga moledora y la duración de los forros; para lo cual se debe de trabajar en forma conjunta con el operador de la mina.**
- **Estos resultados, sumados a los conocimientos atribuidos a la experiencia, son la base de la toma de decisiones y acciones futuras a realizar, por parte de los ingenieros supervisores y analistas de aplicación del mantenimiento de molinos de este tipo.**



## BIBLIOGRAFIA

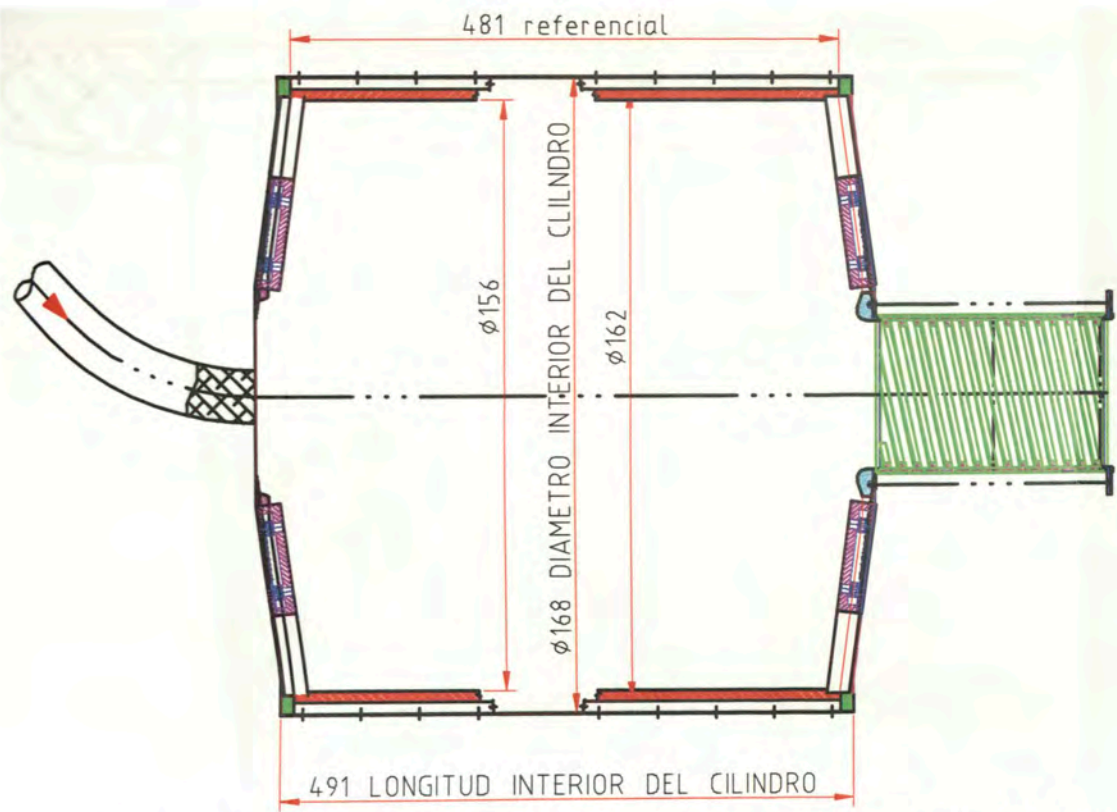
1. BELTRE NINA SONIA MAIRENY, DISEÑO PRELIMINAR DE UNA PLANTA RECUPERADORA, PARA USOS ALTERNOS, DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE NEUMATICOS USADOS , TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO QUÍMICO, PUERTO LA CRUZ,VENEZUELA, JULIO DE 2011.
2. ASTM STANDARS, SECCION 9, RUBBER, NATURAL AND SYNTHETIC-GENERAL TEST METHODS; CARBON BLACK, VOLÚMENES 1 Y 2. 1986 ANNUAL BOOK .ISBN 0—8031-0843-5.
3. MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO DE PERRY.
4. HUKKI, PRICIPLES OF COMMINUTION: SIZE AND SURFACE DISTRIBUTION (ETSIMV, 1996).
5. CATALOGO DE NORDBERG, FABRICANTE USA DE MOLINOS Y EQUIPOS PARA MINERÍA.
6. ING. JUAN FRANCISCO AGUILAR REVOREDO, PREPARACIÓN MECÁNICA DE MINERALES, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, DPTO DE PUBLICACIONES, LIMA –PERÚ.
7. ERROL G. KELÑLY DAVID J. SPOTTSWOOD- INTRODUCCIÓN AL PROCESAMIENTO DE MINERALES -JHON WILEY & SONS.INC. ISBN 0 471-03379-8

8. CATALOGO DE SKEGA ENGINEERING CO.Pvt. Ltd.,DESDE 1995, MATERIAL HANDLING,FABRICANTE SUECO DE REVESTIMIENTOS PARA MOLINOS Y EQUIPOS PARA MINERIA,1998.SKEGA SEALS AB-SIRECH.

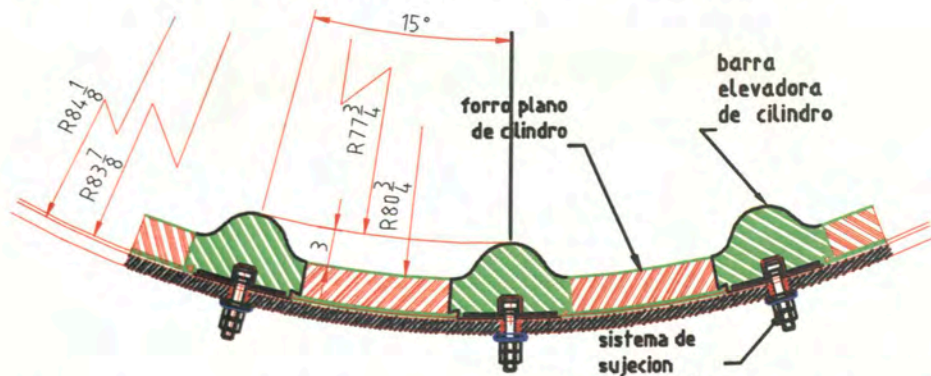
9. CATALOGO TRELLEBORG AB, FABRICANTE USA DE COMPONENTES DE POLÍMEROS Y EQUIPOS MINEROS Y AGRICOLAS. 10. CUADERNO DE INFORMES DE MANTENIMIENTO DE MINING MARCONA (SHOUGANG HIERRO PERÚ S.A.), Ing. Jefe de mantenimiento de la planta magnética. RODOLFO HOSPINAL POZO Asistente Supte. Mant. Mecánico 1966-2000.

11. B.A. WILLS, TECNOLOGIA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES, EDITORIAL LIMUSA, 1987, ISBN 968-18-1986-1.

12. DENVER EQUIPMENT CO., INDEX, SECOND EDITION, VOLUMEN I, 1947.



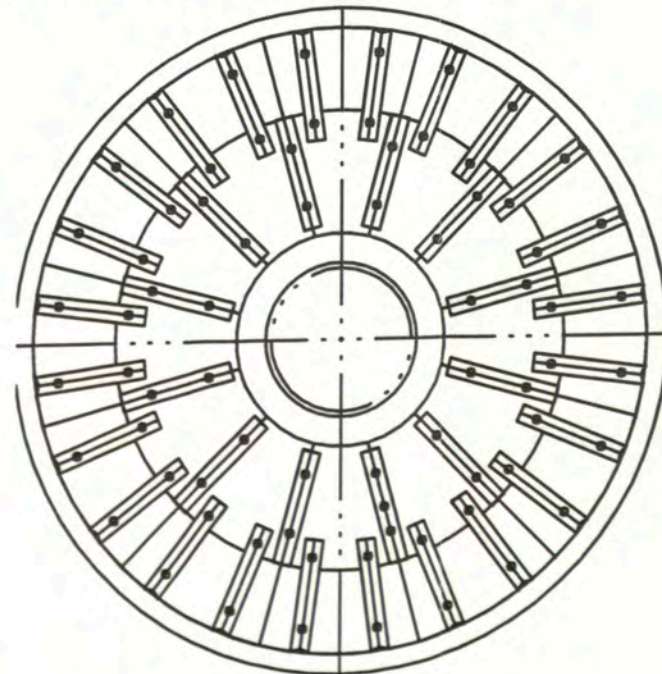
vista en corte de los forros del molino 14 x 41 tapa de alimentacion cilindro y tapa de descarga



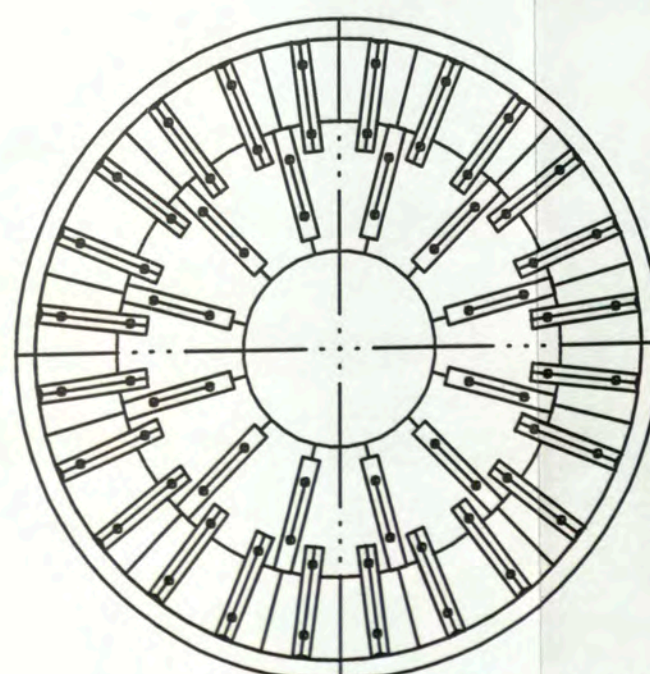
seccion de los forros del cilindro del molino de bolas 14 x 41



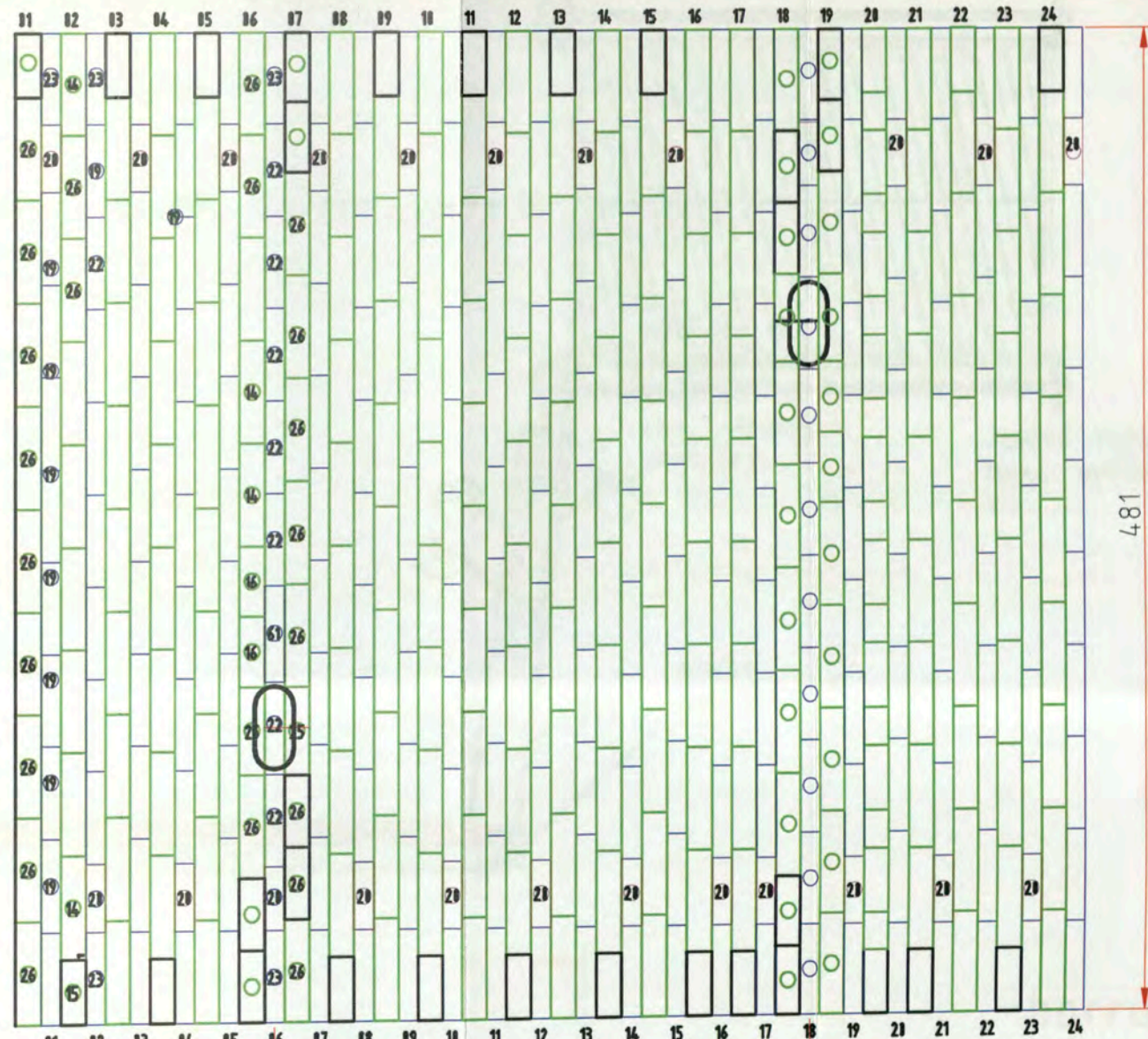
seccion completa del cilindro con 24 hileras de elevadores



vista de la tapa de descarga

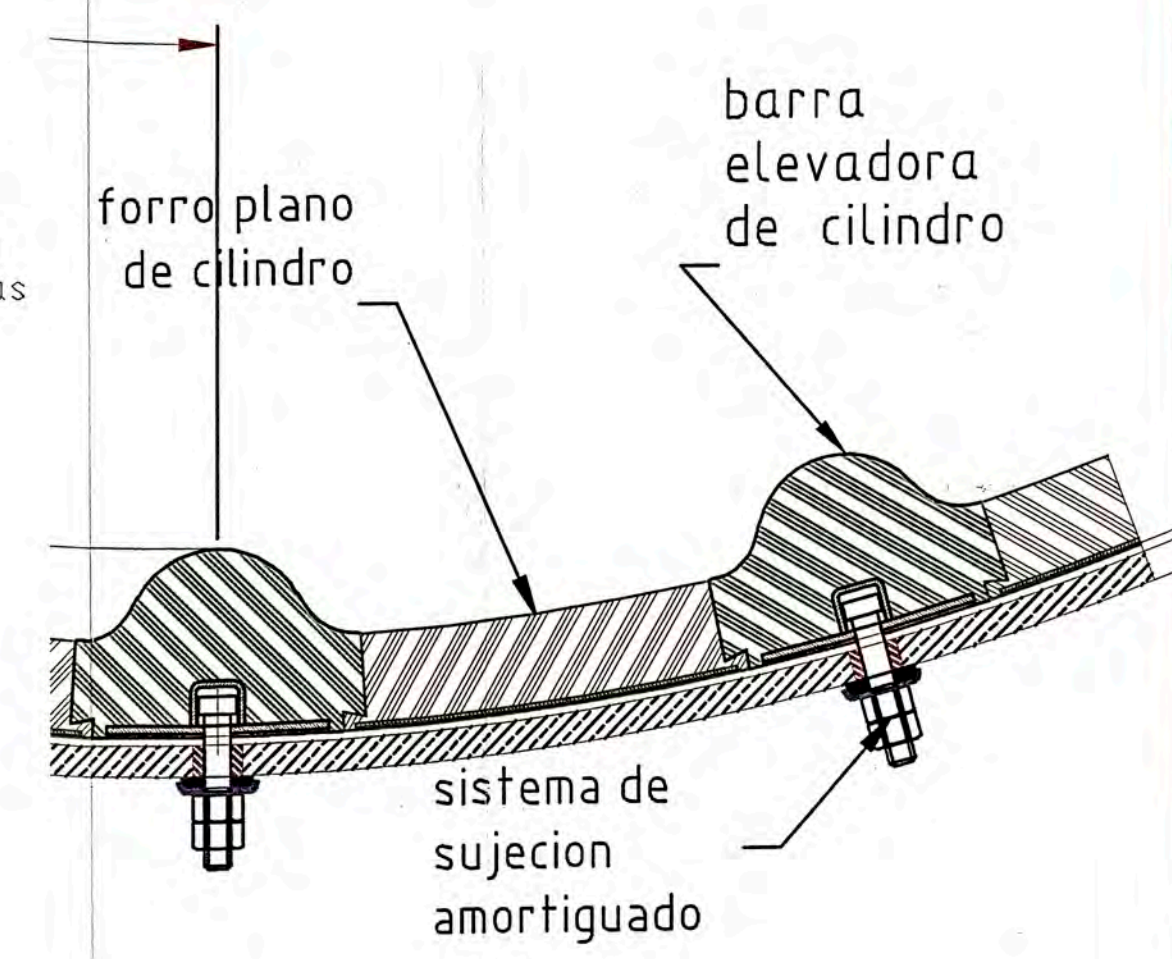
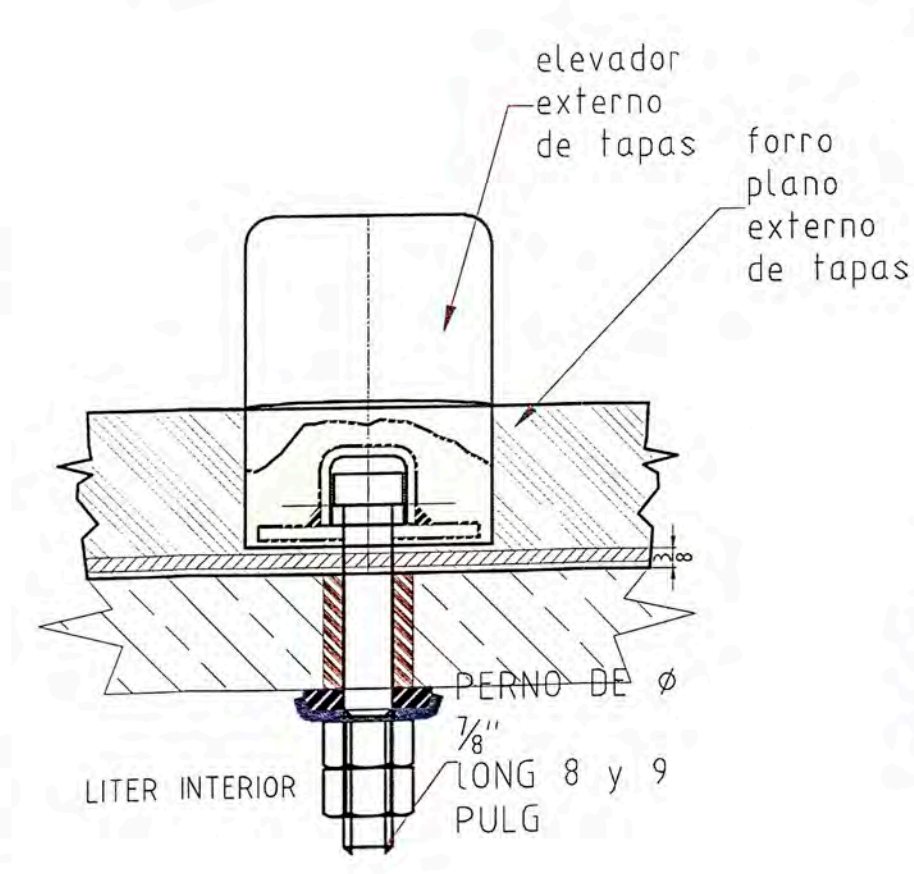
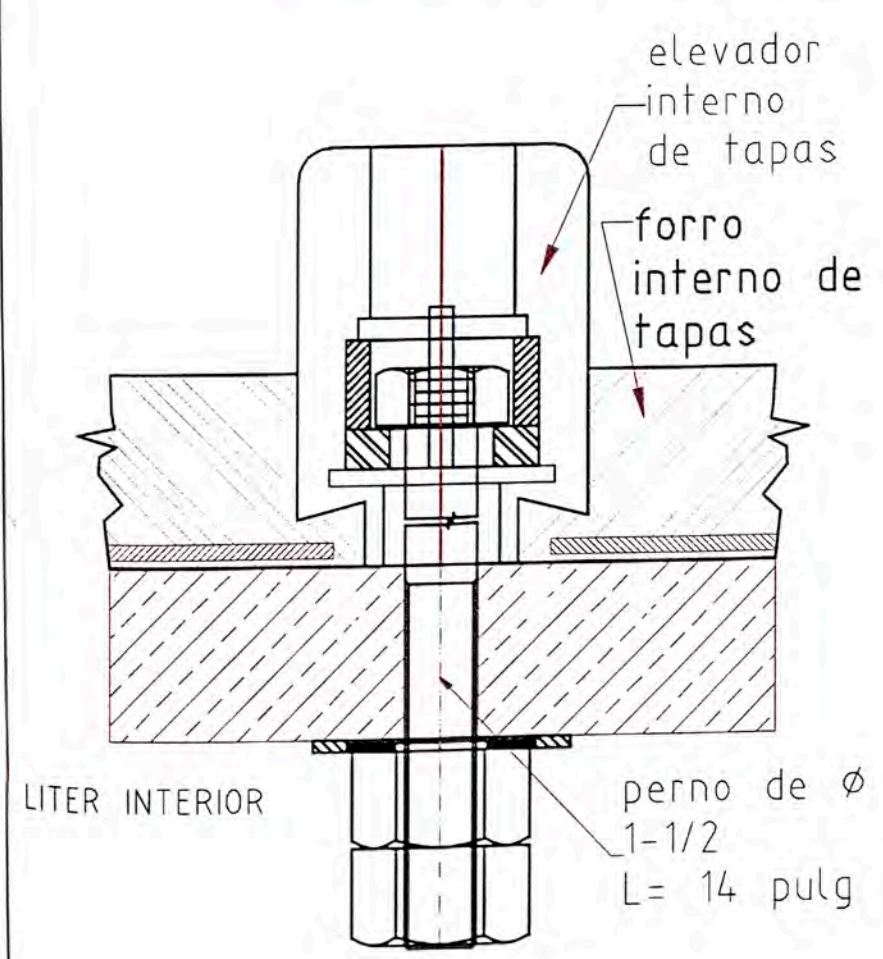
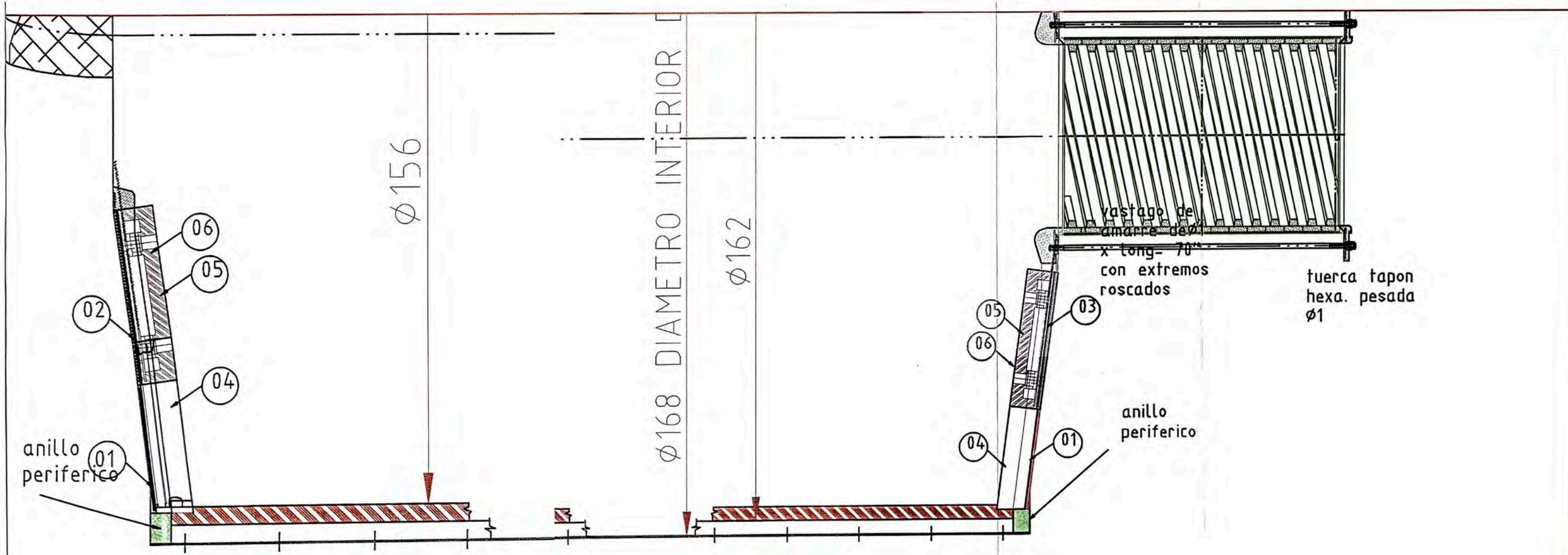


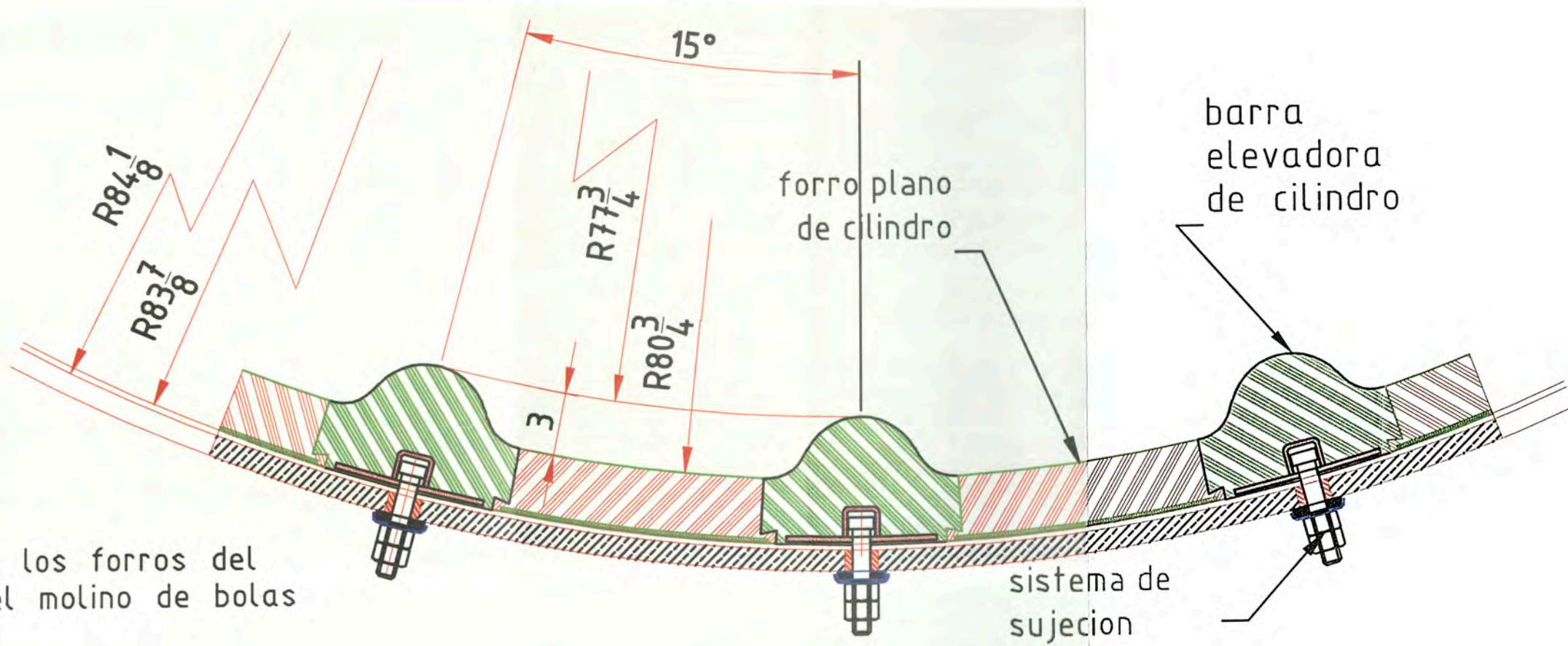
vista de la tapa de alimentacion



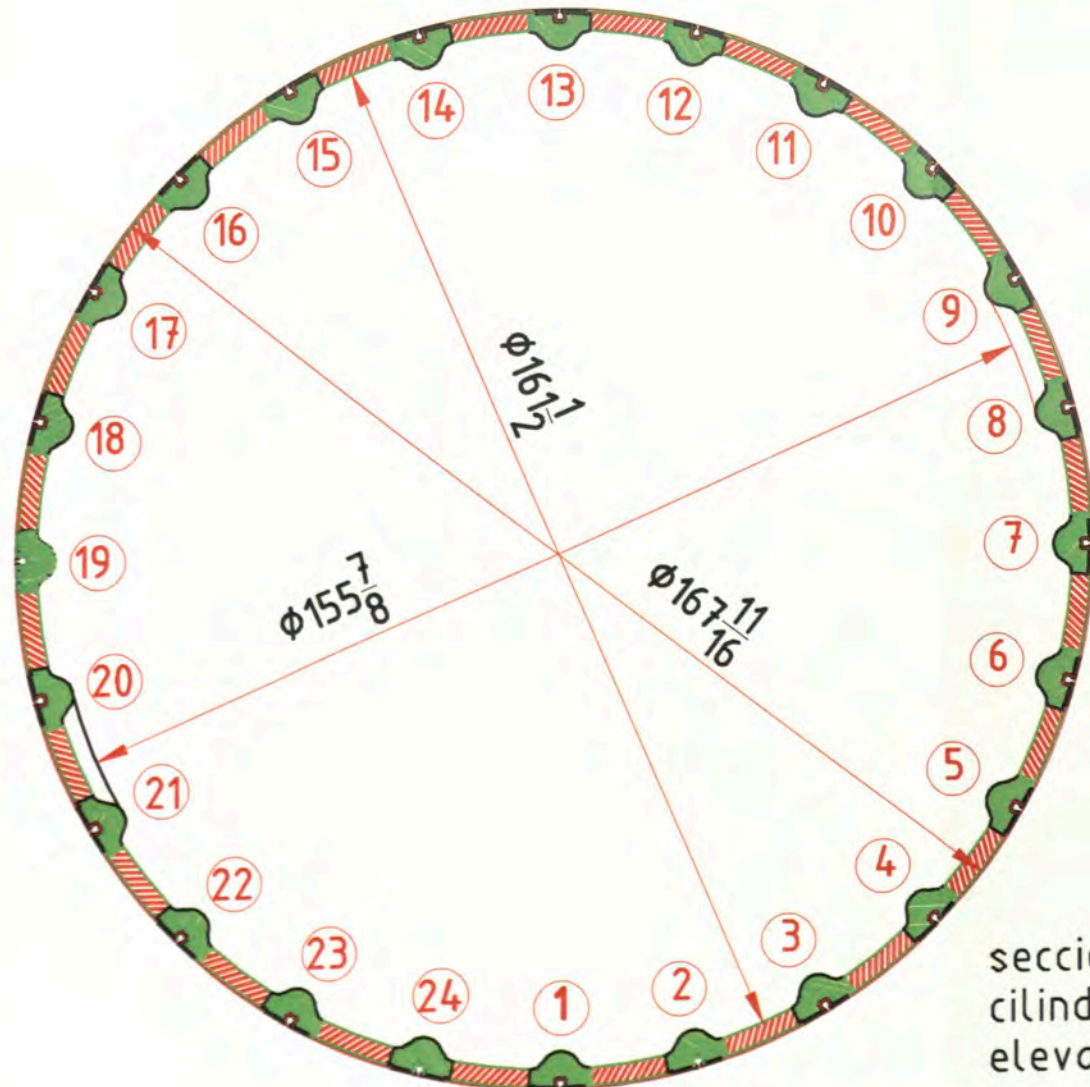
desarrollo de los forros del cilindro molino 14 x 41

38	864	Arandelas de jebes ø7/8" OD=2-3/8" ESP= 3/8"	18	96	Arandelas de jebes ø7/8" OD=2-3/8" ESP= 3/8"
37	864	Sujetador Pt 3/8" x 1-1/4" x 4"	17	23	23 pias
36	128	pias	16	96	Tubo de jebes DE=1-5/8" ESP= 1/4" LG=6 PIES
35	864	CUP WASHER de acero ø15/16" x OD=2-5/16" E= 3/16"	15	96	Sujetador Pt 3/8" x 1-1/4" x 4"
34	1528	Tuerca ø7/8"-8NC hexagonal grado 5 NORMA ASTM 325 TIPO 2	14	96	Cup washer de acero ø15/16" x OD=2-5/16" E= 3/16"
33	864	Perno para elev cabeza cuadrada ø7/8"-8NC x 5" NORMA ASTM TIPO 2	13	24	Tuerca ø7/8"-8NC hexagonal grado 5 NORMA ASTM 325 TIPO 2
32	8	Tuerca ø1-1/2"-8NC hexagonal grado 5 NORMA ASTM 325 TIPO 2	12	48	Pernos CAB HEXAGONAL ø2-1/2"-8NC-14" LONG NORMA ASTM 325 YIPO2
31	4	Perno para elev cabeza cuadrada ø7/8"-8NC x 8" NORMA ASTM TIPO 2	11	48	Tuerca ø1-1/2"-8NC hexagonal grado 5 NORMA ASTM 325 TIPO 2
30	4	Pernos CAB HEXAGONAL ø1-1/2"-8NC-14" LONG NORMA ASTM 325 YIPO2	10	48	Perno para elev cabeza cuadrada ø7/8"-8NC x 10" NORMA ASTM TIPO 2
29	4	Arandelas de caucho de ø1-7/16" x OD=2-15/16 esp=1/2	09	24	Arandelas de caucho de ø1-7/16" x OD=2-15/16 esp=1/2
28	4	Arandela de acero ID=1-9/16" OD=4" ESP= 3/16"	08	24	Arandela de acero ID=1-9/16" OD=4" ESP= 3/16"
27	20	Forros planos 28" long	07	24	Arandela de acero ID=3" OD= 4 ESP= 3/16"
26	204	Forros planos 50" long	06	48	Tapon de levador de interior
25	4	Forros planos 49" long MANHOLE	05	24	Elevadores interiores de tapas de alimentacion y descarga
24	8	Forros planos 35" long	04	48	Elevador exterior de tapas de alimentacion y descarga
23	8	Forros planos 32-1/4" long	03	12	Forro interior de tapa de descarga
22	2	Elevadores de manhole 44-3/4" long	02	12	Forro interior de tapa de alimentacion
21	6	Elevadores 30" long	01	24	Forros exterior de tapa de alimentacion y descarga
20	24	Elevadores 29-1/4" long			
19	234	Elevadores 45" long			
item	cantidad	descripcion de piezas para el cilindro	item	cantidad	forros de las tapas







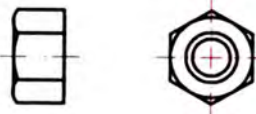
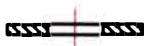
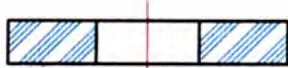
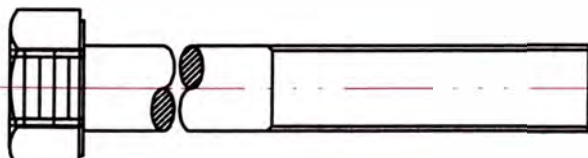


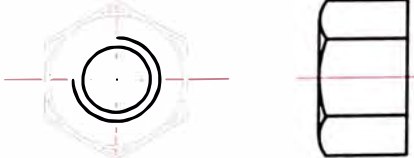
seccion de los forros del cilindro del molino de bolas 14 x 41



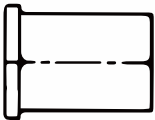
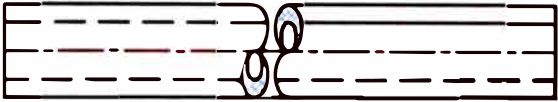



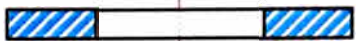
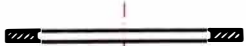

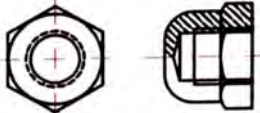
seccion completa del cilindro con 24 hileras de elevadores

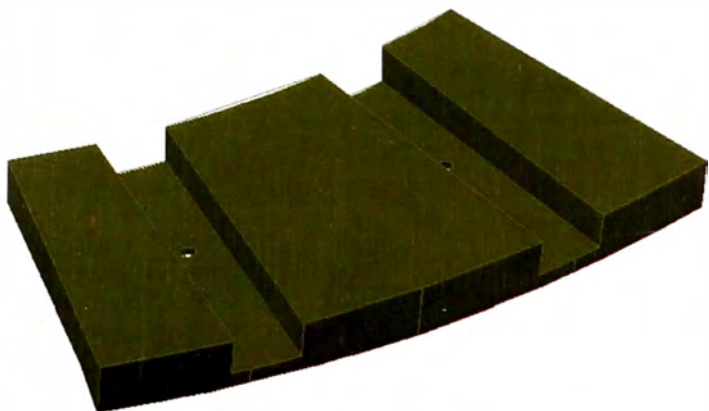
38	864	Arandelas de jebe $\phi 7/8''$ OD= 2-3/8" ESP= 3/8"
37	864	Sujetador Pt 3/8" x 1-1/4" x 4"
36	128 pies	Tubo de jebe DE= 1-5/8" ESP= 1/4" LG=6 PIES
35	864	CUP WASHER de acero $\phi 15/16''$ x OD= 2-5/16" E= 3/16"
34	1528	Tuerca $\phi 7/8''$ -9NC hexagonal grado 5 NORMA ASTM 325 TIPO 2
33	864	Perno para elev cabeza cuadrada $\phi 7/8''$ -9NC x 5" NORMA ASTM TIPO 2
32	8	Tuerca $\phi 1-1/2''$ -6NC hexagonal grado 5 NORMA ASTM 325 TIPO 2
31	4	Perno para elev cabeza cuadrada $\phi 7/8''$ -9NC x 8" NORMA ASTM TIPO 2
30	4	Pernos CAB HEXAGONAL $\phi 1-1/2''$ -6NC-14" LONG NORMA ASTM 325 YIPO2
29	4	Arandelas de caucho de $\phi 1-7/16''$ x OD= 2-15/16 esp=1/2
28	4	Arandela de acero ID= 1-9/16" OD= 4" ESP= 3/16"
27	20	Forros planos 28" long
26	204	Forros planos 50" long
25	4	Forros planos 43" long MANHOLE
24	8	Forros planos 35" long
23	8	Forros planos 32-1/4" long
22	2	Elevadores de manhole 44-3/4" long
21	6	Elevadores 30" long
20	24	Elevadores 29-1/4" long
19	234	Elevadores 45" long
item	cantidad	descripcion de piezas para el cilindro

# SISTEMA DE SUJECION DE MOLINO DE BOLAS $\phi 14 \times 41$ PARTE I

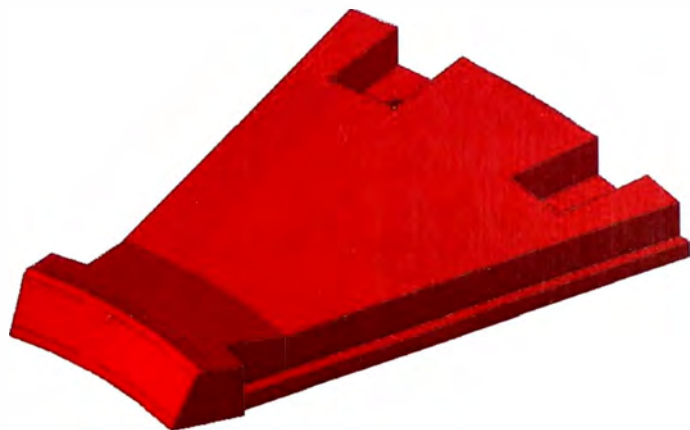
CANTIDAD	ESQUEMA	DESCRIPCION
860		SUJETADOR DE PERNOS PL A-36 DE $3/8' \times 1-5/16' \times 4'$ MATERIAL: ASTM A-36 TIPO 2
760		PERNO CABEZA CUADRADA $\phi 7/8'-9NC-5'$ LONG MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2
1728		TUERCA HEXAGONAL PESADA $\phi 7/8'-8NC$ MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2
1728		ARANDELA DE ACERO DE $3/16'$ DE ESP $\times$ DI= $15/16'$ $\times$ $DE=2-5/16'$ MATERIAL: NORMA ASTM A325 TIPO 2
860		ARANDELA DE CAUCHO DE $3/8'$ DE ESP $\times$ DI= $7/8'$ $\times$ $DE=2-15/16'$ MATERIAL: CAUCHO DE 60° 'A' DE DUREZA
28		PERNO CABEZA HEXAGONAL $\phi 1-1/2'-6NC-13'$ LONG MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2
56		PERNO CABEZA CUADRADA $\phi$ $7/8'-9NC-8'$ LONG MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2
28		ARANDELA DE ACERO DE ESP= $3/16'$ $\times$ DI= $1-9/16'$ $\times$ DE= $2-5/16'$ MATERIAL: NORMA ASTM A325 TIPO 2
52		TUERCA HEXAGONAL PESADA $\phi 1-1/2'-6NC$ MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2

# SISTEMA DE SUJECION DE MOLINO DE BOLAS $\phi 14 \times 41$ PARTE II

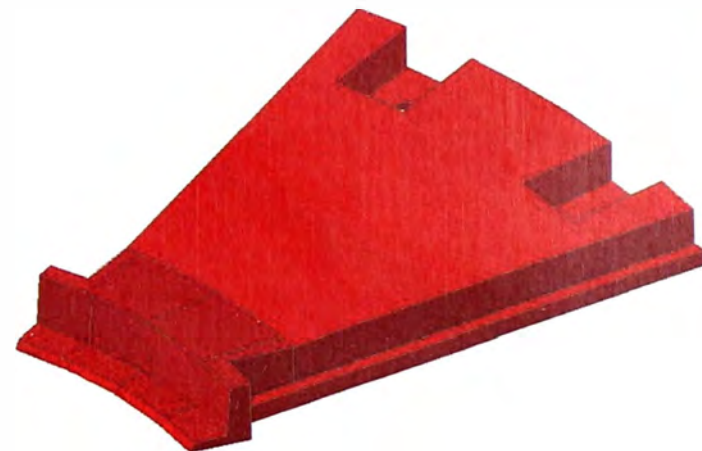
CANTIDAD	ESQUEMA	DESCRIPCION
26		TAPON DE CAUCHO PARA ELEVADOR INTERIOR DE TAPAS MATERIAL: CAUCHO DE 60° SHORE 'A' DE DUREZA
90		TUBO DE JEBE DE= 1-5/8 Y PARED 3/16 EN TRAMOS DE 6 PIES MATERIAL: CAUCHO DE 60° 'A' DE DUREZA
120		RELLENO DE CANAL U DE BARRAS EN TRAMOS DE 6 PIES MATERIAL: CAUCHO DE 60° 'A' DE DUREZA
8		VASTAGO DE AMARRE DE $\phi 1''$ 8NC x L= 70' CON EXTREMOS ROSCADOS DE 3' Y 5' MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2
48		PERNO CABEZA CUADRADA $\phi$ 7/8"-9NC-9' LONG MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2
24		ARANDELA DE CAUCHO DE 1/4' DE ESP x DI= 1-7/16' x DE=2-15/16' MATERIAL: CAUCHO DE 60° 'A' DE DUREZA
24		ANILLO DE PLANCHA A-36 DE 3/16' x DI= 3' x DE= 4' MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2
8		TUERCA HEXAGONAL PESADA $\phi 1''$ -8NC MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2
8		TUERCA TAPON HEXAGONAL PESADA $\phi 1''$ -8NC MATERIAL: ASTM A25 TIPO 2



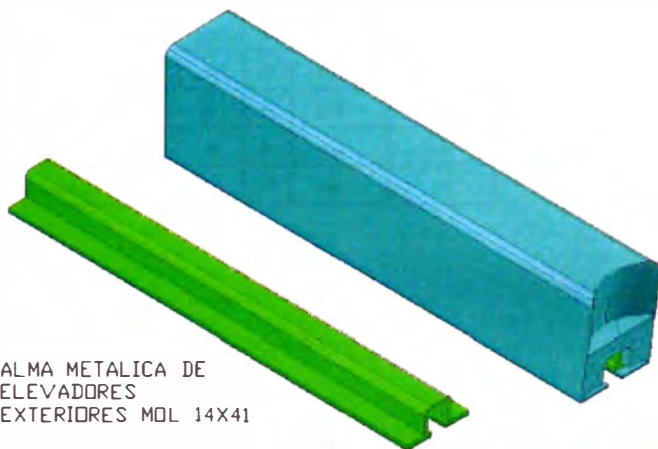
FORRO PLANO EXTERIOR DE LAS TAPAS  
DE MOLINO N° 207 sector de 30"  
1.HACER 12 PIEZAS PARA TAPA DE  
ALIMENTACION  
2.HACER 12 PIEZAS PARA TAPA DE  
DESCARGA  
3.VOLUMEN DE CAUCHO 1713.9 plq 3  
4.peso neto de caucho 32.28  
5.peso neto del alma= 22.6 kg



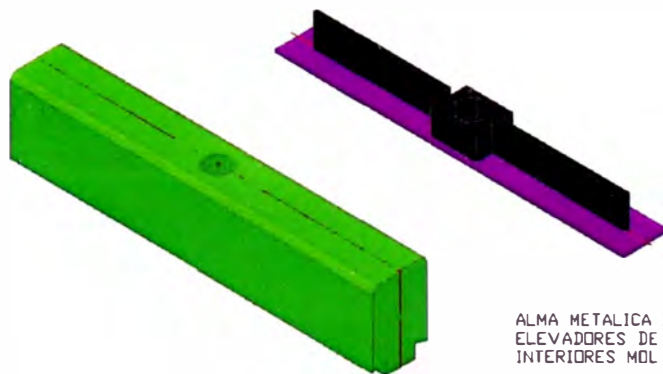
FORRO PLANO INTERIOR DE  
LA TAPA DE ALIMENTACION  
HACER 12 PIEZAS  
PESO DE CAUCHO= 31 Kg  
PESO DE ALMA= 19 Kg



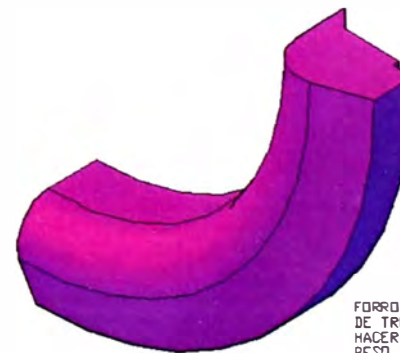
FORRO PLANO INTERIOR  
DE LA TAPA DE DESCARGA  
HACER 12 PIEZAS  
PESO DE CAUCHO= 31 Kg  
PESO DE ALMA= 19 Kg



ALMA METALICA DE  
ELEVADORES  
EXTERIORES MOL 14X41



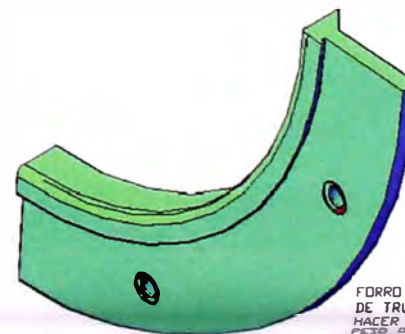
ALMA METALICA DE  
ELEVADORES DE  
INTERIORES MOL 14X41



FORRO TALON INTERIOR DE FORRO  
DE TRUNNION  
HACER CUATRO CUADRANTES  
PESO DEL CAUCHO= 4.83 Kg  
PESO DEL ALMA METALICA= 51 Kg

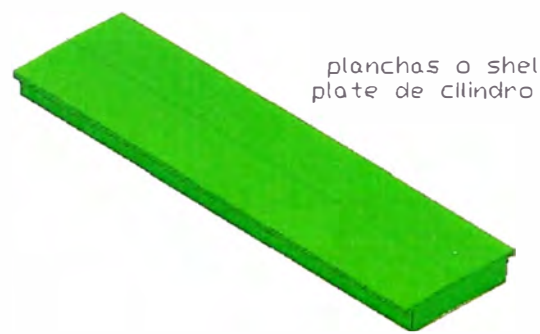
ELEVADORES EXTERIORES DE TAPAS DE  
ALIMENTACION Y DESCARGA DE MOLINO  
14x41 HACER 24 PARA TAPA DE  
ALIMENTACION  
HACER 24 PARA TAPA DE DESCARGA  
PESO DE CAUCHO= 11.31 Kg  
PESO DEL ALMA= 5.27 Kg

ELEVADORES EXTERIORES DE TAPAS DE  
ALIMENTACION Y DESCARGA DE MOLINO  
14x41 HACER 24 PARA TAPA DE  
ALIMENTACION  
HACER 24 PARA TAPA DE DESCARGA  
PESO DE CAUCHO= 11.31 Kg  
PESO DEL ALMA= 5.27 Kg

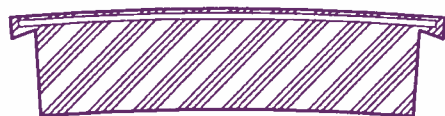


FORRO TALON EXTERIOR DE FORRO  
DE TRUNNION  
HACER CUATRO CUADRANTES  
PESO DEL CAUCHO= 4.83 Kg



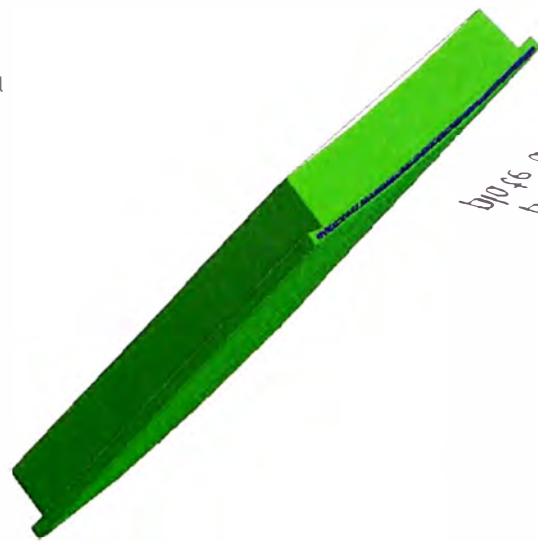


planchas o shel  
plate de cilindro



FORROS PLANOS DE CILINDRO DE MOLINO  
14 X 41  
SECCION DE CAUCHO= 216.6

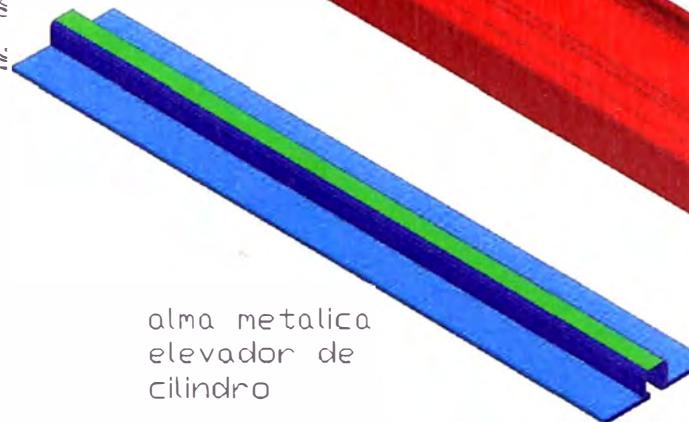
DESCRIPCION	Nº DE PARTE	CANT.	PESES METO CAUCHO Kg	ALMA METALICA Kg
II/2002-1/1	24	20	20.41	9.23
II/2003-1/1	20	20	22.30	21.60
II/2004 part hole	25	04	27.20	13.20
II/2005	26	204	3.63	13.36
II/2006	27	20	17.71	6.20



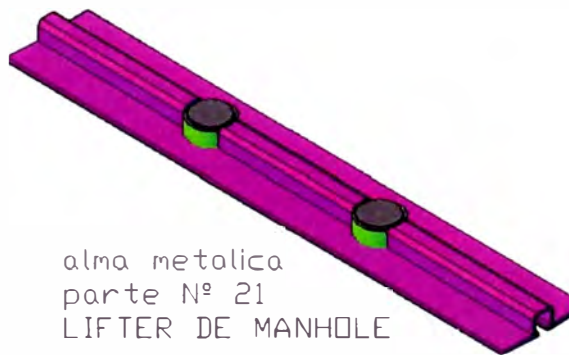
bjo 46 or  
br.



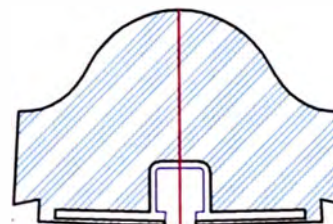
berra  
elevadora  
elevador de  
cilindro



alma metalica  
elevador de  
cilindro

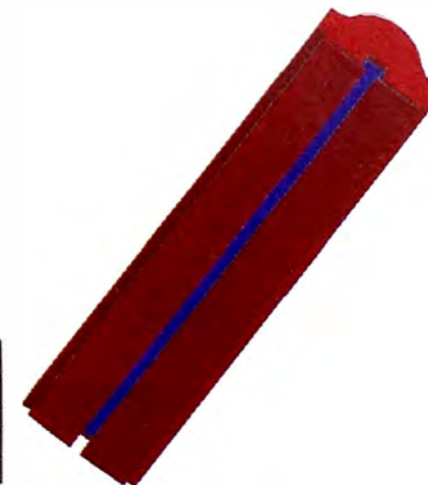


alma metalica  
parte Nº 21  
LIFTER DE MANHOLE



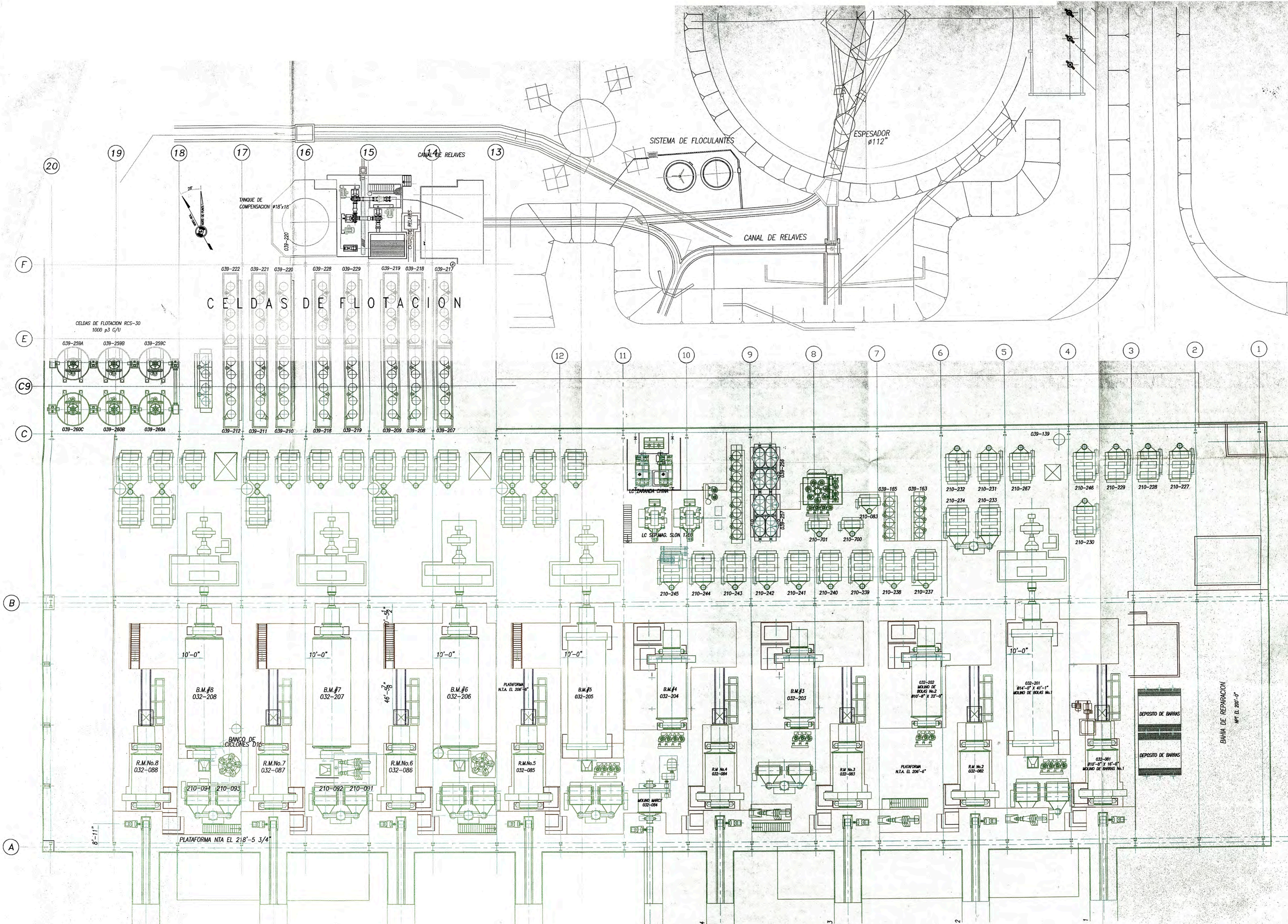
ELEVADORES DE CILINDRO  
DE MOLINO 14 X 41  
SECCION= 39.32 POLG2

Nº DE PARTE	CANT.	MARCA	Kg PESES METO CAUCHO	PESES DEL ALMA
19	224	9.3/4344-7/8	33.25	13.48 Kg
20	24	9.3/4323-1/4	21.67	6.50 Kg
21	20	9.3/4323-13/16	22.10	6.70 Kg
22	20	9.3/4344-7/8	33.25	13.48 Kg



alma metalica de  
las planchas o  
hell plate

elementos de los  
forros del cilindro



## APENDICE ABACOS

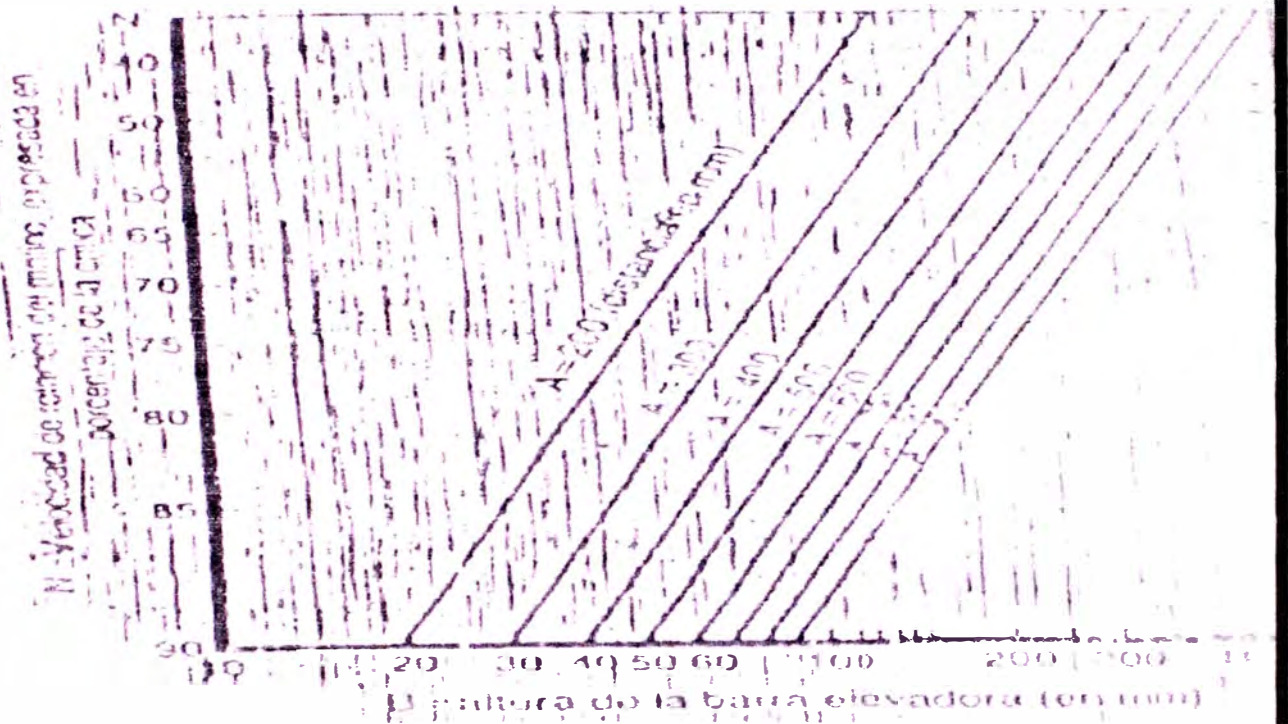


Fig. 4.3: Dimensiones del revestimiento (forro):  $B$ =altura de trabajo de la barra elevadora, mm (escala log.) y  $A$ = Es la cuerda formada entre las bases de dos levantadores adyacentes en mm (escala log.) vs  $N$ =velocidad de rotación del molino, expresado en porcentajes de la crítica.

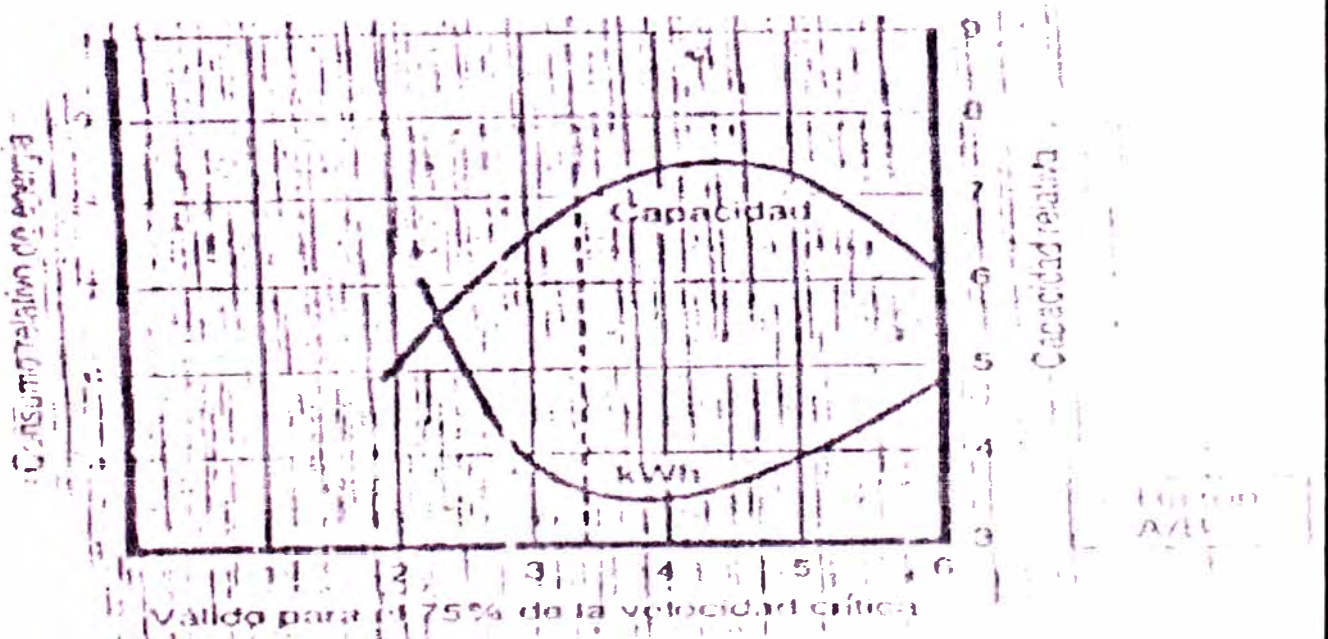


Fig. 4.4:  $A/B$  vs. Consumo relativo de energía y Capacidad relativa, válido para el 75% de la velocidad crítica.

