

CONTROL DE CALIDAD EN LA INDUSTRIA DEL CAUCHO

Elongación o deformación, se refiere a la extensión producida por una fuerza de tensión aplicada a un espécimen estándar y se expresa como porcentaje de la longitud original

II Parte

Tensión

Las propiedades de tensión incluyen esfuerzo, elongación y módulo de tensión. Estas propiedades son determinadas por el estiramiento de una probeta estándar a una velocidad constante con la ayuda de una máquina de tensión.

Se denomina esfuerzo de tensión a la fuerza o esfuerzo, expresado en MPa o N/mm^2 , requerida para romper la probeta estándar por estiramiento a una velocidad constante.

El esfuerzo de tensión de diferentes elastómeros puede variar desde $7 N/mm^2$ hasta por encima de $45 N/mm^2$, dependiendo del elastómero base y de los ingredientes utilizados en la formulación.

La elongación o deformación, se refiere a la extensión producida por una fuerza de tensión aplicada a un espécimen estándar y se expresa como porcentaje de la longitud original. Una elongación del 300%, por ejemplo, significa que el espécimen ha sido estirado 4 veces su longitud original.

Ciro Martínez
Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería de Materiales

La elongación última o rompimiento es el de tiempo de ruptura y se determina simultáneamente con el esfuerzo de tensión. La elongación al rompimiento de diferentes materiales elastoméricos puede variar desde -100% hasta por encima de 1,000%, según la formulación del compuesto.

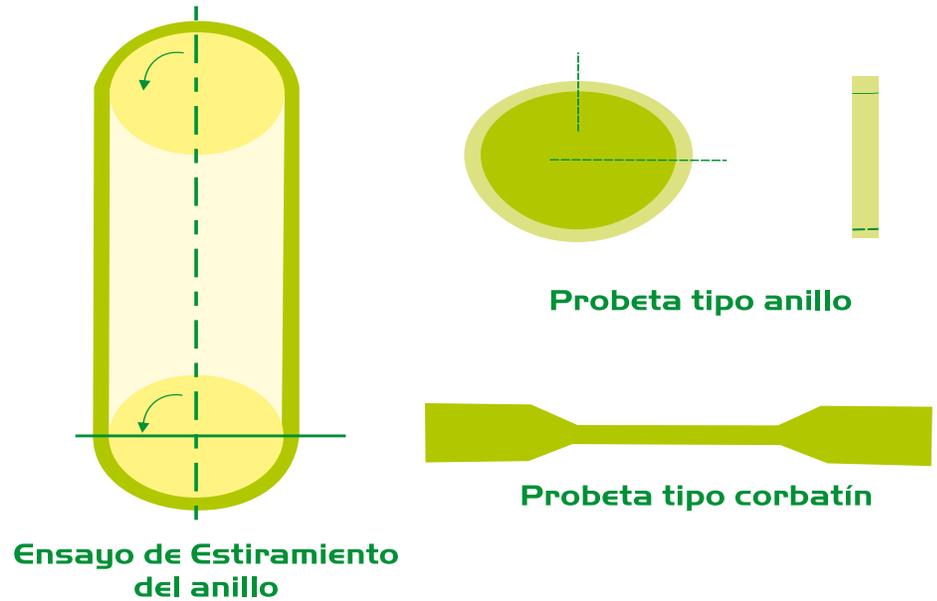
El módulo de tensión que se aplica a los elastómeros se define como la fuerza, expresada en N/mm^2 , requerida para producir una cierta elongación. La elongación de ensayo típica es de 100 o de 300%; entonces, si se requieren $5 N/mm^2$ para producir una elongación de 100%, se dice que el elastómero tiene un módulo al 100% de $5 N/mm^2$.

El módulo de tensión es una medida de rigidez y del grado de vulcanización del compuesto de caucho. Por lo general, se determina durante el ensayo de esfuerzo de tensión. El módulo de un compuesto de caucho al 100% puede variar desde $1 N/mm^2$ hasta por encima de $13 N/mm^2$, según la composición química del compuesto.

Los métodos estándar para determinar las propiedades están dadas en las normas ISO 37, ASTM D 412, BS 903: parte A2 y DIN 53504. El ensayo de tensión involucra el estiramiento de una probeta estándar al rompimiento a con una velocidad constante y una máquina de tensión. La probeta de ensayo corta una lámina moldeada utilizando dos tipos de probetas: las de anillo y las de corbatín.

Algunas normas técnicas permiten usar probetas de una gran variedad

Figura 1. Diferentes tipos de Probetas de Tensión



de dimensiones, aunque varios tipos y formas pueden generar resultados diversos. La medida de resistencia a la tensión decrece con el aumento del área seccional en la pieza de ensayo; más aún, cuando las probetas en forma de anillo arrojan valores más bajos que las de tipo corbatín.

Ésto ocurre principalmente porque en el anillo estirado el esfuerzo de tensión y la deformación no son uniformes sobre el área seccional y varían a un máximo del centro de la circunferencia hasta un mínimo afuera de ella. Por ello es importante establecer comparaciones entre especímenes que presenten características similares de forma y tamaño.

La temperatura a la cual se ejecuta el ensayo afecta de manera significativa los resultados y en consecuencia, se debe controlar y reportar en los resultados. Las temperaturas estándar del laboratorio especificadas en la

norma ISO 37 son $20(\pm 2) ^\circ C$, $23(\pm 2) ^\circ C$ o $27(\pm 2) ^\circ C$.

Las variaciones en la velocidad de la elongación tienen un gran efecto en la última elongación: a medida que se incrementa la velocidad el módulo se incrementa, la última elongación disminuye y la resistencia a la tensión puede aumentar o disminuir (Tabla 1).

Es importante resaltar que las propiedades de tensión son influenciadas por el efecto de grano causado por la acción del mezclado en el molino, lo que genera una orientación regular de las cadenas y moléculas en una sola dirección. Por ejemplo, se obtendrán altos valores de tensión cada vez que los ensayos sean realizados en la misma dirección del grano, es decir, en la misma dirección del mlineado.

Se hace énfasis en que la prueba de tensión debe realizarse en probetas que no hayan sufrido previamente

Tabla 1. Efecto de la velocidad de la elongación en las propiedades de tensión en un compuesto de NBR usando una probeta tipo anillo.

PROPIEDAD	VELOCIDAD DE ELONGACIÓN	
	200 mm/min	500 mm/min
Módulo al 100% (N/mm ²)	3,0	4,5
Módulo al 200% (N/mm ²)	9,0	11,0
Esfuerzo de tensión (N/mm ²)	13,7	14,6
Elongación al rompimiento (%)	320	270

algún tipo de estiramiento.

Hay que tener en cuenta que la curva de esfuerzo-deformación de un compuesto de caucho es única y no se puede obtener de nuevo en un subsiguiente estiramiento, pues el material cambia.

La Figura 2 muestra la curva de esfuerzo-deformación original (I) y una segunda (II) del mismo material pero que ha sido previamente estirado una sola vez al 300% de elongación. Hasta 300% de elongación, la segunda curva muestra deformación más baja, pero continuando con la curva, casi coincide con la primera curva. Este comportamiento se llama esfuerzo de ablandamiento.

Procedimiento de Ensayo

Las propiedades de esfuerzo - deformación de los compuestos de caucho se miden en una máquina de ensayos de tensión, como se ilustra en la Figura 3.

Los antiguos y pesados dinamómetros de péndulo se han reemplazado por los transductores sin inercia que convierten la fuerza en una señal eléctrica.

Las medidas del esfuerzo y la deformación se toman frecuentemente desde cero esfuerzo hasta el punto de rompimiento, los datos se registran gráficamente.

Las probetas de ensayo tipo corbatín de 10 a 13 cm de longitud se cortan con un troquel de una lámina plana y marcándose en la sección más angosta con líneas de separación de 2,5 a 5,0 cm.

Los bordes de las probetas se ubican en las mordazas de la máquina, la cual se activa y fija a la velocidad específica por la norma aplicada. La pieza de ensayo se estira hasta lograr el rompimiento.

La distancia es determinada por las marcas de separación cuando se ocasiona el rompimiento para calcular la elongación.

La temperatura estándar para acondicionar las muestras y realizar el ensayo, generalmente es de 23±2°C.

Significado

Los ensayos de tensión contribuyen al control de la producción. En particular, la resistencia a la tensión es muy sensible a cualquier cambio en los compuestos de caucho, resultado de los percances en su proceso de manufactura.

Los ensayos de

tensión también son usados para determinar la resistencia de los elastómeros al deterioro por acción del calor, líquidos, gases, químicos y ozono, entre otros. Para tales fines, la resistencia a la tensión, el módulo de tensión y la elongación última se miden antes y después de la exposición. Si los cambios obtenidos son mínimos, se espera que los compuestos tengan una larga durabilidad en el tiempo.

Es importante reconocer que las propiedades de tensión se restringen al diseño de ingeniería. No resulta conveniente usar cálculos en los diseños, ya que guardan poca relación con el desempeño práctico. A diferencia del acero, el esfuerzo y la deformación no son proporcionales en los elastómeros, particularmente a altos esfuerzos.

La Figura 4 presenta la resistencia a la tensión de diferentes elastómeros para diferentes durezas. Estas curvas son un instructivo para los técnicos del caucho y reafirman la idea que no se deben usar para los cálculos en los diseños de ingeniería o con fines de

Figura 2. Curva de esfuerzo - deformación

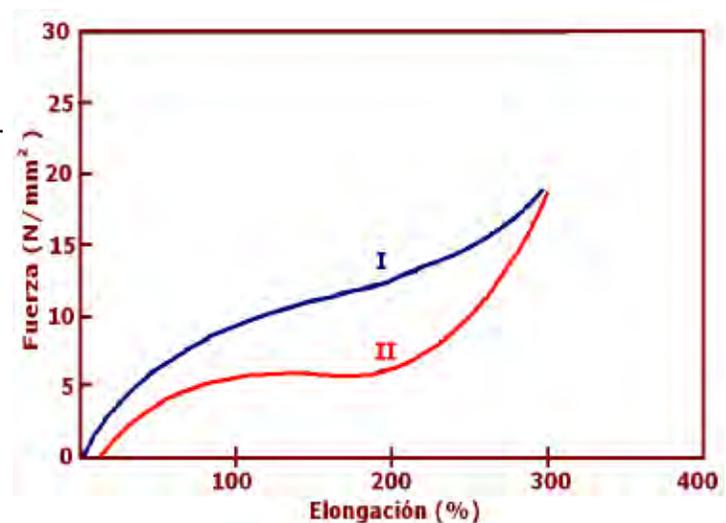


Figura 3. Máquina de ensayos de tensión la cual mide la elongación y el esfuerzo mediante un extensómetro.



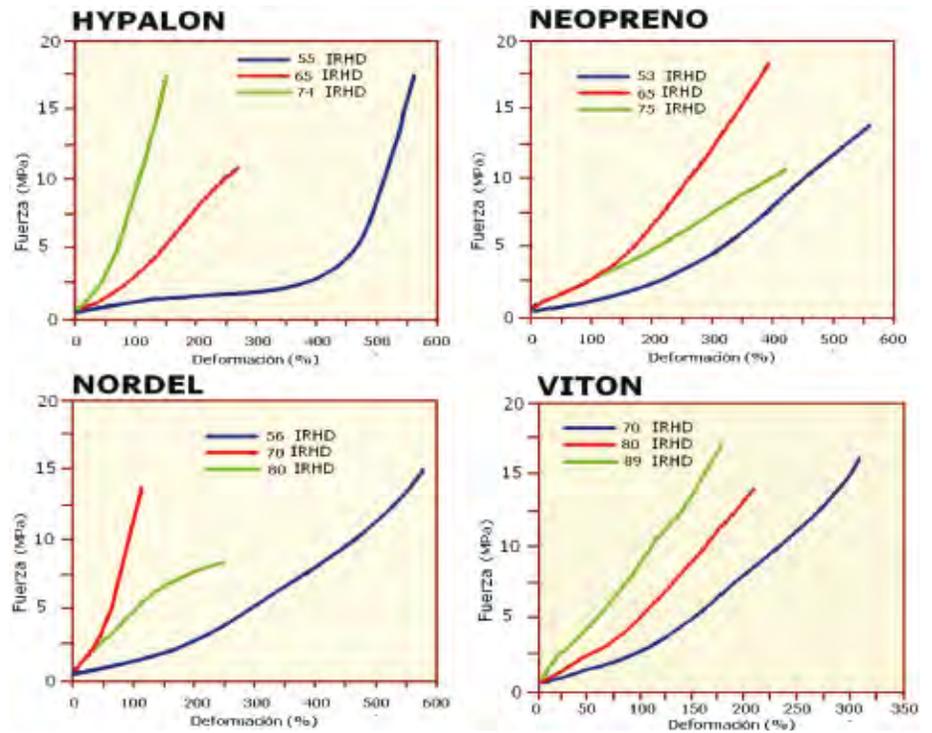
seleccionar un compuesto para una aplicación específica.

Así mismo, las propiedades de tensión no son un indicador confiable de la calidad del caucho. Los compuestos con resistencia a la tensión por debajo de 7 MPa son usualmente los que más adolecen de la mayoría de las propiedades mecánicas, y aquellos que tienen una resistencia a la mayor tensión de 21 MPa tienen las mejores.

Sin embargo, en la mitad de este rango -10 y 20 MPa-, cubre la gran mayoría de los productos de caucho, la correlación entre la resistencia a la tensión, estas propiedades como la resiliencia, resistencia a la abrasión, compresión set y resistencia a la flexión son, en el mejor de los casos, pura casualidad.

Los compradores de productos de

Figura 4. Curvas de esfuerzo - deformación en tensión



caucho que sobre-especifican las propiedades de tensión, observarán que están pagando un precio innecesariamente alto, o que tal vez están sacrificando otras propiedades que sean más importantes.

Cabe resaltar que en las especificaciones de los productos de caucho se deben basar más en el servicio, que en los ensayos físicos arbitrarios. La resistencia a la tensión y la elongación son propiedades útiles para los técnicos del caucho en el desarrollo de compuestos, control de manufactura y para determinar la resistencia de los compuestos al ataque de varios químicos.

Los ensayos de tensión son aplicados universalmente para determinar el efecto de varios ingredientes y son particularmente útiles cuando tales ingredientes

afectan la velocidad y el estado de la vulcanización del caucho.

De igual modo, estas pruebas son excelentes para el control de calidad del producto una vez que el compuesto ha sido seleccionado. Estos ensayos son muy sensibles a los cambios en las condiciones de manufactura y se pueden emplear para identificar una sub o sobre vulcanización.

Los ensayos de tensión también se pueden efectuar antes y después de alguna exposición para determinar la resistencia relativa de un grupo de compuestos al deterioro por calor, aceites, ozono, condiciones ambientales, químicos, etc. Aún en pequeñas escalas de deterioro, se notan cambios en las propiedades de tensión. La retención de las propiedades de tensión son mucho más significativas que el valor absoluto antes y después

del ensayo de exposición. Por ejemplo, si la resistencia a la tensión de un caucho cae de 21 a 14 MPa después de una exposición en aceite, y un segundo caucho de 12 a 11 MPa, es éste el que más se acomodaría a la práctica. Una retención de la resistencia a la tensión superior es un buen indicador de que el segundo caucho retendrá más de sus otras propiedades.

Permanent SET

Los elastómeros no son perfectamente elásticos. Son materiales visco-elásticos que se comportan parcialmente como un líquido viscoso y un sólido elástico. Una deformación prolongada deja en algunas ocasiones un grado de deformación permanente, lo cual significa que una parte de la deformación se recupera y otra se retiene. La *compression set*, los esfuerzos de relajación y la cedencia elástica o “*creep*” son propiedades de cambios progresivos que resultan de aplicar de manera prolongada un esfuerzo o deformación.

Tensión Set

Los métodos para medir la *tensión set* en Europa generalmente se rigen por la norma ISO 2285, que consisten en estirar una probeta estándar o un corbatín, tal como se observa en la Figura 5 con un esfuerzo constante, mantiene la elongación durante un período de tiempo determinado; la carga se remueve permitiendo su recuperación durante 30 minutos. El incremento en la elongación entre las marcas de la pieza de ensayo,

expresado como porcentaje de la longitud original, es el set permanente en tensión.

$$\text{Tension Set} = \frac{L_i - L_0}{L_s - L_0} \times 100$$

Donde:

L_0 : Longitud original de referencia de la probeta.

L_s : Longitud de referencia de la probeta estirada.

L_i : Longitud de referencia después de la recuperación.

El porcentaje de deformación se debe seleccionar según la aplicación final del vulcanizado y referente a la elongación, hasta el rompimiento y a la temperatura del ensayo.

Generalmente se utiliza un valor de 100% pero también se aceptan valores de 25%, 50%, 200% y 300%. Los ensayos pueden efectuarse a temperaturas de 23°C, 70°C, 85°C, 100°C, 125°C o 150°C y la duración del ensayo puede ser

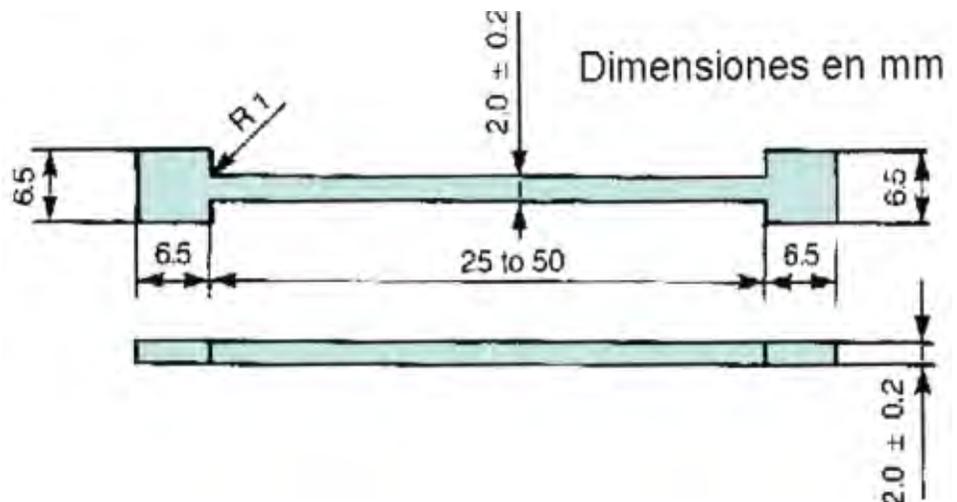
24, 72 o 168 horas. El período de recuperación después que se ha retirado la deformación a la pieza es de 30 minutos.

Compresión Set

Si el elastómero se comprime bajo condiciones específicas, el decrecimiento residual en su espesor después de remover la fuerza de compresión se conoce como *compression set*. Ésta usualmente se expresa como un porcentaje de la deflexión utilizada. Un porcentaje de 100% de *compression set* significa una deformación completa; 0% significa ausencia de deformación. El valor de *compression set* depende de la temperatura, cantidad y duración de la deformación.

Es requisito esencial para una baja *compression set* la temperatura de servicio en los materiales de sello. La *compression set* no debe ser 100%, aún después de largos períodos de tiempo. Es la tendencia permanente a llegar a su forma original, manteniendo la fuerza necesaria para el sellado

Figura 5. Medidas de la Probeta de Tensión Set.



entre las superficies.

Los métodos estándar para la medida de la *compression set* a temperaturas bajas, ambiente y altas se explican en la Tabla 2.

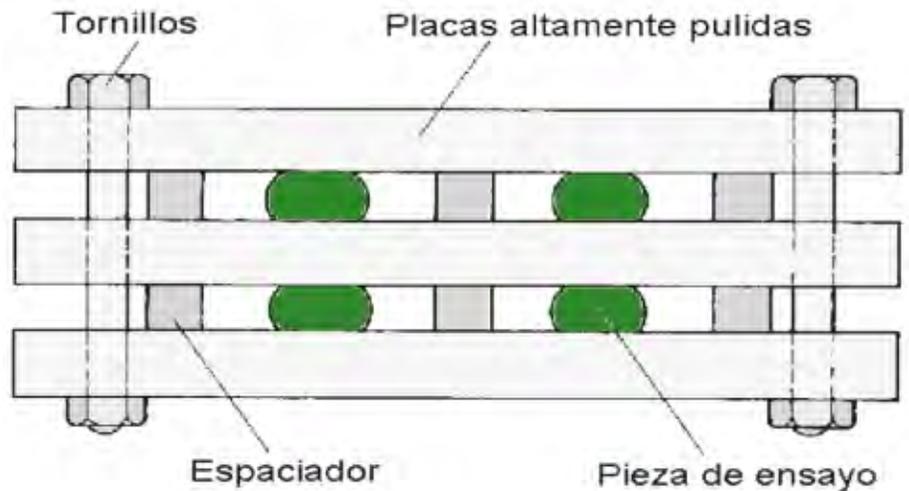
Allí se emplean dos medidas de discos para el ensayo, que son los que se utilizan para el ensayo de los esfuerzos de relajación. Los especímenes de ensayo se comprimen hasta un determinado porcentaje de su altura original, dependiendo de su dureza.

El aparato de *compression set* se fija a un tiempo y a una temperatura específica y después mide el espesor recuperado. La *compression set* se diferencia entre el espesor original y el espesor después de la recuperación, y se expresa como porcentaje de la deflexión utilizada.

En contraste con el ensayo de los esfuerzos de relajación, la *compression set* es fácil de medir, y requiere un aparato simple y de bajo costo (Figura 6).

Se comprimen pequeños discos de dimensión conocida a una altura fija en un montaje simple de guías. Las guías constan de dos o más placas metálicas paralelas, las cuales deben ser lo suficientemente rígidas para permitir la deformación de las probetas sin que se doblen,

Figura 6. Aparato de Compresión



teniendo una medida tal que pueda albergar las piezas de ensayo. Los platos se unen mediante tuercas y tornillos.

Las barras espaciadoras son de un diámetro apropiado y se ubican entre los platos para controlar el espesor de la pieza de ensayo cuando se encuentra comprimida.

Las medidas recomendadas para los discos son 13,0 mm de diámetro por 6,3 mm de espesor o 29,0 mm de diámetro por 12,5 mm de espesor (Figura 7).

Las dos clases de probetas no siempre dan las mismas medidas de *compression set* y las comparaciones se deben hacer con las mismas probetas de ensayo.

El uso de lubricantes en las superficies de contacto es opcional y puede, en algunos de los casos, dar resultados más reproducibles.

Sin embargo, el lubricante puede afectar el resultado de la *compression set* y nuevamente, las comparaciones sólo deberán hacerse cuando las condiciones de ensayo sean similares.

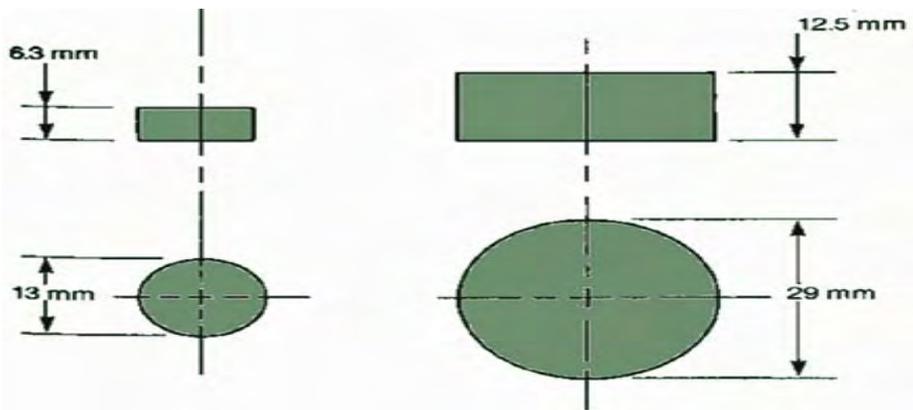
Es recomendable que al menos tres probetas sean ensayadas para determinar los resultados que se promedien. Las tuercas de sujeción deberán apretarse firmemente hasta que las placas estén en contacto con los espaciadores, los cuales generalmente tienen una medida que proporcionan una deformación del 25% a las piezas de ensayo.

El dispositivo de la *compression set* con las piezas de ensayo se sitúa en la parte central del horno a las temperaturas recomendadas de 23°C o una de las nueve temperaturas entre 70°C y 250°C. La duración del ensayo es de 24 horas para temperaturas elevadas o de 72 horas a 23°C. Se pueden

Tabla 2. Métodos estándar para la medida del *compression set*.

ESTÁNDAR ISO	TÍTULO	Norma correspondiente
815	Caucho vulcanizado. Determinación del <i>compression set</i> bajo deflexión constante a temperatura normal y elevada.	ASTM D 395 BS 903, parte A 6 DIN 53517
1653	Caucho vulcanizado. Determinación del <i>compression set</i> bajo deflexión constante a bajas temperaturas.	ASTM D 1229 BS 903, parte A 39 DIN 53517

Figura 7. Medidas de las Probetas de Compression Set.



establecer otras condiciones siempre y cuando los ensayos comparativos se realicen bajo las mismas condiciones.

Al final del tiempo específico, las piezas de ensayo se remueven de las guías y se les da un tiempo de recuperación de 30 minutos a 23°C antes de medir de nuevo el espesor.

La *compression set* es la diferencia entre el espesor original de la pieza de ensayo y el espesor después de la recuperación, expresado como un porcentaje de la compresión aplicada inicialmente.

Compression

Set a Esfuerzo
Constante

$$= \frac{T_0 - T_r}{T_0 - T_s} \times 100$$

Donde:

T₀: Espesor original de la pieza de ensayo.

T_r: Espesor de la pieza de ensayo después de su recuperación.

T_s: Espesor de la barra espaciadora.

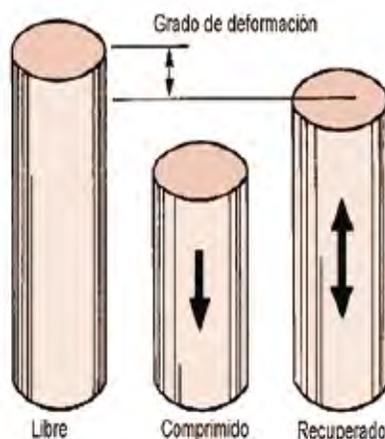
Significado

Las medidas de la "*permanent set*" pueden ser útiles para el control de producción, porque indican el grado de vulcanización que ha tomado lugar en el compuesto, además es útil para seleccionar compuestos entre varias alternativas.

Los compuestos no deseados pueden ser identificados si la "*permanent set*" falla en un rango alto. De otro lado, si la "*permanent set*" se encuentra en un bajo rango, las diferencias entre los valores probablemente no darán una indicación verdadera del desempeño en servicio.

La principal dificultad con la "*permanent set*" es el tiempo de

Figura 8. Diagrama ilustrativo de Compression Set.



ensayo, es relativamente corto con relación al tiempo en servicio. Por ejemplo, las empaquetaduras de las tuberías del alcantarillado principal deben retener sus propiedades de sellado por décadas, en donde el ensayo sólo se hace en unas cuantas horas.

La "*compression set*" es el grado de recuperación de una parte elastomérica, pero no es una medida de la fuerza que él ejerce, la cual es materializada en el sellado. Sin embargo, se ha encontrado que hay una muy buena correlación entre el "*compression set*" y el esfuerzo de relajación.

La medida "*compression set*" no necesariamente se correlaciona con el desempeño en el servicio. De hecho, el hinchamiento causado por el contacto con el fluido en servicio puede compensar la "*compression set*". Por otra parte, una combinación de una alta "*compression set*" y una contracción puede dar lugar a escapes.

Existe una tendencia generalizada a sobre-enfatizar en el valor de la "*compression set*". No obstante, es necesario tener un buen balance de todas las propiedades para obtener un desempeño óptimo.

Finalmente, es importante anotar que el "*compression set*" es un ensayo efectivo como control de calidad para evaluar el estado de cura.