

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÓDULO DE BULK DE TUBERÍAS FLEXIBLES PARA SISTEMAS OLEOHIDRÁULICOS

RESUMEN

En este artículo se presenta una técnica experimental para medir el módulo de bulk de mangueras flexibles utilizadas en sistemas de potencia fluida. Se bombea aceite al interior de la manguera y la presión aumenta hasta alcanzar el valor máximo permitido por una válvula limitadora de presión. Luego, se mide el tiempo transcurrido durante el incremento de presión y este valor, junto con la información sobre el módulo volumétrico del aceite, se aplica en la definición de módulo efectivo para deducir el módulo de la manguera. También se calcula su coeficiente de expansión volumétrico y se ajusta a una curva de regresión polinomial que presenta buena correlación.

PALABRAS CLAVES: Tubería flexible, módulo de bulk, hidráulica.

ABSTRACT

This paper presents an experimental technique to measure the bulk modulus of flexible hoses used in fluid power systems. Oil is pumped into the hose and the pressure increases up to the maximum value allowed by a limiting pressure valve. The time elapsed to change from low to high pressure is measured and used, along with the information of bulk modulus of the oil, in the definition of effective bulk modulus to find the bulk modulus of the hose. The volumetric expansion coefficient is also calculated and adjusted to a polynomial regression curve, which have an good correlation.

KEY WORDS: Hydraulic Hoses, Bulk Modulus, Hydraulics.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda cada vez mayor de confiabilidad y seguridad de los sistemas de potencia fluida lleva a los diseñadores y usuarios al estudio de su dinámica, la cual requiere no sólo el conocimiento de las particularidades de operación, sino también de cada una de las características de los elementos y componentes que hacen parte de los mismos.

La compresibilidad (medida por el módulo de bulk o el coeficiente de compresibilidad) de los aceites utilizados en los sistemas hidráulicos de alta presión es uno de las características de perturbación y cambio que más influye en su respuestas porque afecta la frecuencia natural y la estabilidad del sistema, la transmisión eficiente y dinámica de potencia, además de que puede tener implicaciones serias en la seguridad de operación. Por esta razón, la determinación de la compresibilidad o su inverso el módulo de bulk efectivo β_e , se hace indispensable en procesos de almacenamiento y transporte de crudo y derivados del petróleo, así como también en servomecanismos hidráulicos, donde la exactitud del control y la rapidez de respuesta a cambios de velocidad y posición son fundamentales.

El módulo de bulk efectivo β_e (o aparente) de una mezcla de aceite y gas almacenada en un recipiente elástico, depende de la compresibilidad del aceite, de la compresibilidad del gas y la elasticidad del recipiente. Para el caso de un sistema hidráulico a presión, todos los elementos del sistema que manejan el fluido a presión se comportan como recipientes más o menos elásticos.

En este trabajo se presenta una técnica para medir experimentalmente en el laboratorio el módulo de bulk de tuberías flexibles (mangueras) utilizadas en sistemas oleohidráulicos. La metodología consiste en calcular el volumen de aceite agregado al sistema para alcanzar una determinada presión, y medir el tiempo transcurrido para un cierto incremento de presión Δp , con un caudal conocido y constante durante la prueba.

Por medio de esta técnica se logra determinar una función del coeficiente de expansión volumétrico con respecto a la presión. El factor de correlación para la regresión entrega valores aceptables que permiten validar la técnica.

MARIO HOYOS MESA

Ingeniero Mecánico. Ms.C
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira.
marhoyos@utp.edu.co

LUZ ADRIANA MEJÍA C

Ingeniera Mecánico
Estudiante Maestría en Sistemas Automáticos de Producción
Universidad Tecnológica de Pereira
adriamec@yahoo.com

EDISON HENAO C

Ingeniero Mecánico
Estudiante Maestría en Sistemas Automáticos de Producción
Universidad Tecnológica de Pereira
edisonhenao@utp.edu.co

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS TUBERÍAS FLEXIBLES UTILIZADAS EN LOS SISTEMAS OLEOHIDRÁULICOS

Las tuberías y mangueras hidráulicas son las encargadas de interconectar los diferentes componentes y conducir el fluido dentro del sistema hidráulico. Su elección en el sistema hidráulico depende en gran medida de factores como: presión estática y dinámica, máximo caudal, compatibilidad con los diferentes fluidos, facilidad para el servicio, vibración, permisividad a las fugas, condiciones ambientales y costos. Dependiendo de la flexibilidad requerida en la aplicación, se seleccionan las tuberías, ya sean rígidas o flexibles. Estas últimas son muy utilizadas en sistemas móviles o en aquellos en los que la vibración puede provocar daños o fugas del sistema.

Las mangueras utilizadas en sistemas hidráulicos de presión son fabricadas por capas de elastómeros, fibras y mallas de acero. Cada capa está diseñada para cumplir una necesidad particular.

El tubo interno está hecho generalmente por algún tipo de goma sintética, o termoplástica como el nylon. Debe ser químicamente resistente al líquido que transporta.

Las capas de refuerzo suministran la fuerza para resistir la presión del sistema. Pueden ser fabricadas con materiales textiles o alambre. Algunos materiales textiles usados son el algodón, rayón, poliéster, nylon y kevlar. Los materiales para las mallas de alambre pueden ser acero al carbono, acero inoxidable, acero galvanizado, o bronce. Hay tres métodos utilizados para el refuerzo de la manguera. El más común es el trenzado, donde el alambre o los materiales textiles son entrelazados, para mangueras que trabajan en el rango de baja y alta presión. Para aplicaciones de muy alta y ultra alta presión, el refuerzo es generalmente enrollado en espiral sobre la manguera. Las mangueras hidráulicas se fabrican normalmente con el ángulo neutral en la trenza para reducir la expansión volumétrica. Dependiendo de los rangos de presión se utilizan capas múltiples.

La cubierta es la parte más externa de la manguera, su función es la de proteger al tubo y el refuerzo de daños externos. Los materiales de la cubierta son determinados según su aplicación y su capacidad de resistir la abrasión, rayos ultravioleta, químicos y temperaturas extremas.

Las mangueras están disponibles en varios diámetros y rangos de presión. Son ampliamente usadas por su fácil instalación, y poseen la característica de absorber golpes de presión y vibración en los equipos.

Existen especificaciones en la industria que establecen los estándares para las tuberías flexibles. Es el caso del estándar SAE que incluye especificaciones en cuanto a

frecuencia de impulsos, rangos de presión, rangos de temperatura y requerimientos dimensionales.

El proceso de selección de mangueras debe basarse siempre en la aplicación y el rendimiento requeridos. Existen muchas mangueras de productos híbridos en el mercado que van más allá de los requerimientos estándar de rendimiento de la industria y deben ser incluidas en el proceso de selección.

Los estilos de mangueras varían en rangos de presión de acuerdo a sus medidas y construcción. En la industria se han dividido los rangos de presión en cinco categorías:

- Baja presión: 200 – 300 psi
- Media presión: 250 – 300 psi
- Alta presión : 1125 – 5000 psi
- Muy alta presión: 2000 – 4000 psi
- Ultra alta presión: 3000 – 10000 psi

Cada una de éstas, presenta coeficientes de dilatación o expansión volumétrica que dependen tanto del tipo de mangueras (capas) como de los diámetros de las mismas. La figura 1 muestra la disposición de las capas para la manguera utilizada en el presente trabajo.

SAE 100R2, TIPO AT



Tubo interior:	Neopreno.
Refuerzo:	Dos entramados de alambre de alta resistencia a la tensión.
Capa exterior:	Caucho sintético resistente al agua y al aceite.
Temperatura:	-40°F hasta 212°F.

Figura 1. Capas en una manguera flexible

3. INFLUENCIA DEL MÓDULO DE BULK DEL RECIPIENTE EN EL MÓDULO DE BULK EFECTIVO

Cuando un recipiente de volumen inicial V_i , que contiene una mezcla de aire y líquido, se somete a una fuerza de compresión F , se genera una presión P que comprime la mezcla y deforma el recipiente (figura 2). El módulo de bulk efectivo β_e de este sistema puede calcularse como sigue:

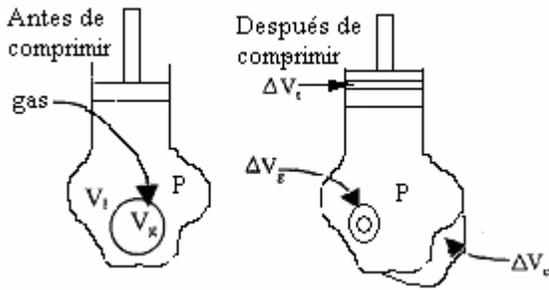


Figura 2. Recipiente con aire y aceite sometidos a presión.

$$V_t = V_l + V_g$$

$$\Delta V_t = -\Delta V_g - \Delta V_l + \Delta V_r$$

donde:

V_t es el volumen total,

V_l es el volumen del líquido

V_g es el volumen del gas

El módulo de bulk se define como:

$$\beta_e = -\frac{\Delta P}{\Delta V_t / V_t} \quad (1)$$

donde β_e es el módulo de bulk efectivo (de todo el sistema recipiente, líquido, aire)

Reemplazando en (1) el valor de V_t y ΔV_t y tomando en cuenta que $V_t = V_r$, se obtiene:

$$\frac{1}{\beta_e} = \left(\frac{V_g}{V_t}\right)\left(\frac{1}{\beta_g} - \frac{1}{\beta_l}\right) + \frac{1}{\beta_l} + \frac{1}{\beta_r}$$

Si el sistema se encuentra libre de gas, entonces:

$$\frac{1}{\beta_e} = \frac{1}{\beta_l} + \frac{1}{\beta_r} \quad (2)$$

3.1. Módulo de bulk para tubería flexible

En el caso de la tubería flexible, es preciso consultar con el fabricante el coeficiente de expansión volumétrica. Otros fabricantes presentan el módulo de bulk, que en su caso se asocia a la expansión debido a la presión, y su valor puede oscilar entre 10000 y 50000 psi. Sin embargo, no todos los fabricantes y distribuidores cuentan con estos datos.

La figura 3 muestra los coeficientes de expansión volumétrica de mangueras comúnmente utilizadas en sistemas de potencia fluida que fueron probadas según la norma SAE J343.

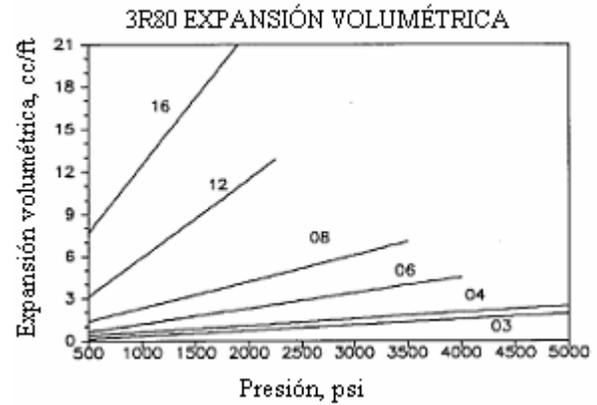


Figura 3. Coeficiente de expansión volumétrica Vs presión para mangueras tipo SAE 100R8 de diferente tamaño [6]

Algunos fabricantes determinan experimentalmente el coeficiente de expansión volumétrica y lo presentan como función de la presión para cada tipo y dimensión de manguera, como se observa en la tabla 1.

Volumetric expansion of hose in cubic centimeters per foot (cc/ft)			
Hose	Volumetric expansion at maximum working pressure		Equation for volumetric expansion y (cc/ft); x (psi)
	(psi)	(cc/ft)	
201-04	3000	1.50	y = 0.0005x
201-05	3000	1.60	y = 0.0005x + 0.098
201-06	2250	2.20	y = 0.001x

Tabla 1. Coeficiente de expansión volumétrica tubería flexible Parker [5]

4. MEDICIÓN EXPERIMENTAL DEL MÓDULO DE BULK PARA TUBERÍAS FLEXIBLES

El módulo de Bulk de la tubería se determina mediante la ecuación (2), para lo cual se debe asumir que:

- Se conoce de antemano el valor del módulo de bulk del aceite, determinado según norma ISO 6370[3].
- El ensayo se realiza adiabáticamente.
- El caudal entregado por la válvula reguladora de caudal es constante en el tiempo y no varía con la presión.
- El aire contenido en el sistema se encuentra disuelto en el aceite, por lo cual su influencia no es tenida en cuenta.

El módulo de bulk efectivo se determina mediante la ecuación 1.

Δp se determina en forma directa por medio de un transductor de presión. Para hallar ΔV_t se determina el tiempo Δt necesario para el incremento de presión requerido, teniendo en cuenta que $\Delta V_t = Q \cdot \Delta t$ y que el caudal Q que pasa a través de la válvula reguladora es constante.

4.1. Equipo Experimental

La figura 4 presenta un diagrama del circuito hidráulico utilizado. Una válvula reguladora de caudal Vickers FCG 02 1500 50 entrega un caudal predeterminado (Q) de aceite. Los valores de caudal se miden con un caudalímetro tipo turbina Stauff SFM – 060-UN y los de presión con un transductor de presión SPT-5000-N04-420-MD.

Las mediciones se registran en un Scopemeter 124 marca Fluke el cual posee una pantalla para visualizar los datos. El Scopemeter permite además digitalizar los datos registrados en pantalla y almacenarlos en un archivo.

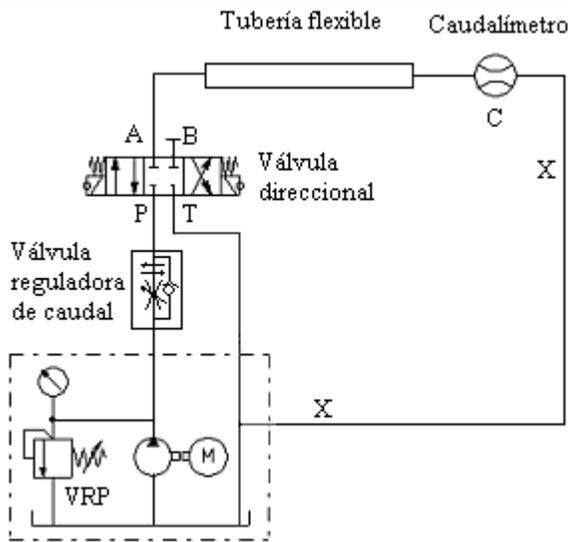


Figura 4. Circuito hidráulico utilizado para determinar el módulo de Bulk efectivo.

4.2. Procedimiento

Se ajusta la válvula reguladora de caudal a 0, 45 gpm. Este valor se mide con el caudalímetro (C). Luego, el caudalímetro se reemplaza por el transductor de presión y se bloquea la salida a tanque (XX). Se ajusta la presión con la válvula reguladora de presión (VRP) y se registra en el osciloscopio la evolución de la presión en el tiempo como lo indica la figura 5. Los valores de ΔP y ΔT se leen directamente de la pantalla del Scopemeter.

NOTA: también se pueden determinar los valores de ΔP y ΔT a partir de los datos digitalizados por el Fluke. Con

ΔP y ΔT se calcula el β_e a partir de la fórmula 1 y conocido el módulo de compresibilidad del aceite β_1 se determina el módulo de la manguera β_r a partir de la fórmula 2.

5. RESULTADOS

La figura 5 presenta una de las gráficas entregada por el osciloscopio, de donde se obtienen los valores de Δ voltaje (Δp) y Δt . Se realiza la prueba para mangueras DAYCO 100R2 AT-06 que poseen un diámetro interno de 9.525 mm y longitudes de 1, 2 y 3 m.

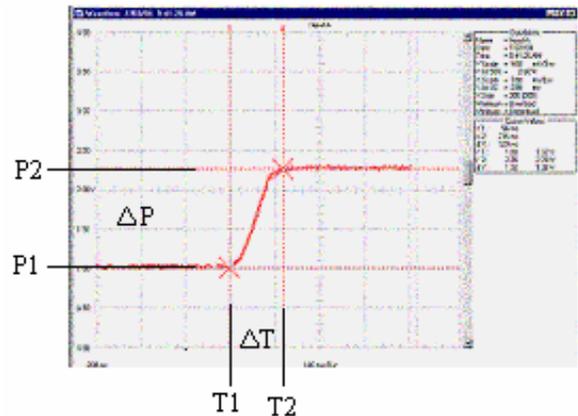


Figura 5. Incremento de presión en la manguera

Aplicando la ecuación (1) se obtienen los valores de módulo de Bulk Efectivo del sistema y se presentan en la figura 6.

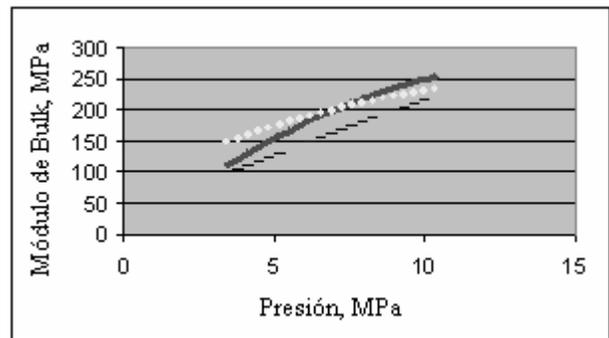


Figura 6. Módulo de bulk efectivo. ----- 1 metro, — 2 metros,3 metros.

Los valores de β_1 (módulo del aceite) se toman de la norma ISO 6370 para un aceite Tellus 46, a temperatura promedio de 40°C, la densidad de éste aceite a 15°C es 870 kg/m³. La tabla 2 muestra los valores de β_1 .

Presión psi	Módulo de bulk del aceite	
	psi	MPa
500	210363	1450
550	210580	1451.5
600	210798	1453
650	211016	1454.5
700	211233	1456
750	211451	1457.5
800	211668	1459
850	211886	1460.5
900	212104	1462
950	212321	1463.5
1000	212539	1465
1050	212756	1466.5
1100	212974	1468
1150	213191	1469.5
1200	213409	1471
1250	213627	1472.5
1300	213845	1474
1350	214062	1475.5
1400	214280	1477
1450	214497	1478.5
1500	214715	1480

Tabla 2. Módulo de bulk del aceite Tellus 46.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La figura 7 presenta los valores obtenidos de módulo de bulk de las mangueras utilizadas Figura 6. Módulo de bulk para manguera tipo 100R2 AT -06.

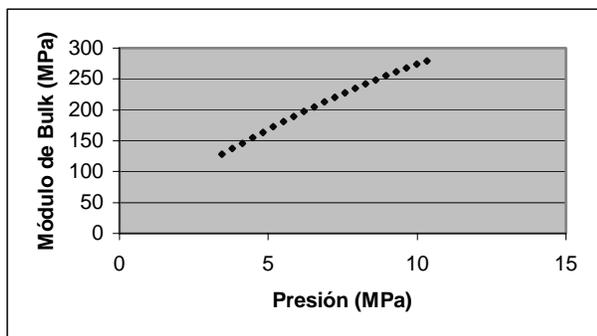


Figura 7. Módulo de bulk. Manguera tipo 100R2 AT -06.

Como en la industria, los fabricantes de mangueras hidráulicas se refieren al coeficiente de expansión volumétrica para expresar el grado de deformación que estas presentan con la presión, se construyen las curvas presión vs coeficiente de expansión volumétrica y se presentan en la figura 8.

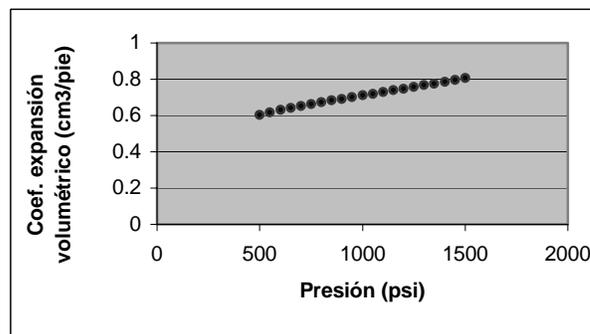


Figura 8. Coeficientes de expansión volumétrica para mangueras tipo 100R2 AT -06.

Al comparar la gráfica de la figura 6 con la presentada en la figura 9 para una manguera tipo SAE R2, se observa que la curva determinada experimentalmente en el laboratorio, presenta valores de módulo de bulk muy próximos. La discrepancia puede explicarse por la diferencia en los diámetros internos de la mangueras.

En la figura 7, se observa una tendencia polinomial con respecto a la presión con un excelente factor de correlación de $r = 1$, donde β_m está dada por:

$$\beta_m = -0,7421 \cdot p^2 + 32,274 \cdot p + 25,532 \quad (4)$$

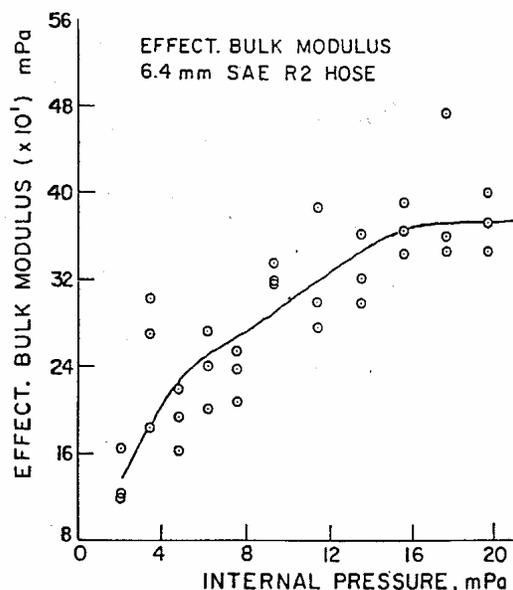


Figura 9. Módulo de Bulk efectivo para manguera SAE R2

Para la regresión lineal se obtiene un factor de correlación $r = 0,998$; con:

$$\beta_m = 22,043 \cdot p + 57,558$$

La figura 8 ilustra el comportamiento de la expansión volumétrica de la manguera con el incremento de la presión. Se observa una fuerte relación lineal entre el

coeficiente de expansión y la presión, con un valor $r = 0,999$, donde:

$$CEV = 0,0002 \cdot p + 0,5137,$$

CEV es el coeficiente de expansión volumétrico en cm^3/pie y p la presión en psi .

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La importancia de las características de los elementos utilizados en los sistemas hidráulicos muestra la necesidad de contar en el con técnicas que permitan determinar dichos parámetros. Se ha desarrollado en este trabajo una metodología que nos permite determinar de forma experimental el módulo de bulk de tuberías flexibles comúnmente utilizadas en los sistemas oleohidráulicos. Esta metodología, además de ser práctica, es sencilla y utiliza equipos y herramientas propias de un laboratorio corriente, y puede ser llevada a cabo por los estudiantes de pregrado y posgrado dentro de sus prácticas en las asignaturas de fluidos, hidráulica y sistemas de potencia fluida y control.

La regresión determinada para el coeficiente de expansión volumétrico, presenta un alto valor de correlación, por lo tanto, su utilización para diseño y simulación de sistemas hidráulicos es confiable. Es de aclarar, que la ecuación generada por la regresión es válida únicamente para el tipo de manguera probada (100R2 AT - 06). Es posible determinar también la relación entre el diámetro de la manguera y el coeficiente de expansión volumétrico, variando su dimensión interior. Sin embargo, en el laboratorio utilizado se cuenta únicamente con mangueras de 3/8" de diámetro interno.

Para mejor evaluación y perfeccionamiento del método propuesto, se recomienda la realización de ensayos con mangueras comerciales de diferentes diámetros.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BLACKBURN J.F, REETHOF G., SHEARER J.L. Fluid Power Control. The Massachusetts Institute and Technology, Cambridge, 1960.
- [2] HOYOS, M. Notas de clase del curso de Potencia Flúida y Control (sin publicar). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, II semestre de 2002.
- [3] ISO STANDARD 6370: 1997 (E). Prediction of the bulk Moduli of petroleum fluids used in hydraulics fluid power systems
- [4] McCLOY D. AND MARTÍN H.R. Control of Fluid Power: Analysis and Design. 2^a edición. Ellis

Hoorwood, 1980.

- [5] www.parker.com/hpd/services/tal/tal_42.asp
- [6] <http://www.synflexhose.com/frames.cfm?page=hydraulic.cfm>
- [7] www.tecnicaoleohidraulica.com/h_09_mangueras.htm
- [8] Hydraulic hose and coupling. Dayco