

Corrección por temperatura de los patrones volumétricos de desplazamiento positivo en la metrología de los hidrocarburos

Agustín García-Berrocal Sánchez ⁽¹⁾, **Cristina Montalvo Martín** ⁽¹⁾, **Miguel Balbás Antón** ⁽¹⁾,
Fernando de Lis Muñoz ⁽²⁾, **Juan Blázquez Martínez** ⁽³⁾

*(1) Cátedra-Empresa CLH de Metrología de los Hidrocarburos.
ETSI de Minas. Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
agustin.garciaberrocal@upm.es*

*(2) Unidad de Metrología. I. A. Loeches.
Compañía Logística de Hidrocarburos CLH*

(3) División de Fisión Nuclear. CIEMAT

Dentro de la Metrología de los hidrocarburos líquidos (gasolinas, gasóleos y querosenos), el instrumento que como patrón proporciona las mejores exactitudes es el medidor volumétrico de desplazamiento positivo (MDP). El MDP es un instrumento mecánico de medida basado en una cavidad de paredes deslizantes que mide el paso de una sucesión de cantidades discretas de volumen. El ciclo logístico de los combustibles líquidos requiere asegurar la trazabilidad y minimizar la incertidumbre de sus mediciones para garantizar la transferencia de custodia entre los propietarios del combustible y el operador logístico. Estas operaciones tienen gran incidencia económica y fiscal; En los cargaderos, los MDP que miden la cantidad de hidrocarburo como volumen equivalente a 15 °C deben calibrarse frecuentemente para verificar el error máximo legalmente permitido. Para ello, el MDP de cargadero se acopla en serie con un MDP patrón y se realiza la calibración de aquél por comparación con éste. Las lecturas del MDP patrón deben corregirse por temperatura, pero ni los fabricantes ni la literatura (normas o publicaciones) especifican cómo aplicar la corrección. En el presente trabajo, se propone un modelo semiempírico para caracterizar el sistema mecánico de medida del MDP. Uno de los parámetros del modelo coincide directamente con el coeficiente de temperatura del equipo y permite cuantificar la corrección a aplicar. El modelo se valida analizando estadísticamente los históricos de calibración de un número suficientemente representativo de MDP patrón de un mismo tipo. El valor del parámetro correspondiente al coeficiente de temperatura se obtiene empíricamente; ensayando, a tal efecto, dos MDP patrón de un mismo tipo a diferentes temperaturas.

1. INTRODUCCIÓN

Según el Boletín de Hidrocarburos, el volumen anual de crudo consumido en España durante 2011 alcanzó los $53,8 \times 10^9$ litros [1]. Su traducción económica es variable con los precios de mercado, pero del orden de 70 G€; y, dado el alto valor impositivo del producto, la Hacienda Pública ingresa por este concepto un 5 % del PIB, unos 50 G€. Con estas cifras, un error sistemático del 1 % tendría un montante económico equivalente de 500 M€ [2]. No es de extrañar que las normas de metrología legal [3] exijan, por ejemplo, que el error de los caudalímetros de oleoducto (turbinas) sea inferior al 0,3 %.

Si para la Hacienda el error es significativo, es mucho más crucial para los balances económicos de las compañías logísticas. Se aplica aquí el concepto de transferencia de custodia [4], que significa que, hasta el usuario final, el petróleo pasa por varios Operadores. Una primera transferencia de custodia se produce en el embarque del crudo, pero hay varias más: refinería, tránsito por oleoductos, entrega a las instalaciones de almacenamiento y dispensación a camiones cisterna en dichas instalaciones. En cada transferencia de custodia hay que medir, con la máxima exactitud, la cantidad trasegada.

De manera que la cantidad total se mide al menos cinco veces, una en cada cambio de custodia.

La magnitud utilizada en la transferencia de custodia es el volumen equivalente a 15 °C. Se requieren, por tanto, medidores de grandes volúmenes de líquido. Por su exactitud y frecuencia de uso, destacan los caudalímetros de turbina y los medidores de desplazamiento positivo (MDP). En la actualidad, las turbinas empiezan a ser sustituidas por medidores de caudal por ultrasonidos, pero siguen siendo usadas masivamente para caudales mayores; para caudales menores, se usan los MDP, que a su vez se emplean como patrones de transferencia para la calibración de los probadores de las turbinas. Se concluye que el MDP es el equipo fundamental para la medida de volúmenes de hidrocarburos líquidos refinados. Como ejemplo: en España durante 2010 se cargaron 54,4 millones metros cúbicos de productos refinados en 1,44 millones de camiones, realizándose más de 7,9 millones de medidas de MDP.

Desde los primeros tiempos de la industria del petróleo [5] se reconoció el papel fundamental de este equipo de medida, por lo que existen normas para su calibración. En la práctica, la calibración se expresa mediante un factor f , conocido como *meter factor*, tal que: Volumen real = (Volumen medido) $\times f$. El factor f depende sobre todo del caudal, la viscosidad y la temperatura del hidrocarburo. Hay pues, al menos, una matriz de tres dimensiones de puntos de calibración, lo que hace difícil su uso práctico en las transferencias de custodia. Una forma práctica de proceder consiste en calcular un factor de calibración para cada tipo de producto: gasolina, gasóleos y queroseno; y así, la matriz de tres dimensiones se convierte en una ordinaria de dos dimensiones, al no depender de la viscosidad.

El MDP es un equipo mecánico, de manera que las correcciones a la medida pueden hacerse teniendo en cuenta su estructura interna y las leyes de la física de fluidos. Esta sería una aproximación teórica. Por otra parte, el meter factor puede medirse, con sus correcciones, sin hacer referencia a modelo alguno; se trataría entonces de una aproximación empírica. En este trabajo se ha optado por una aproximación semiempírica, se construye un modelo basado en las necesidades prácticas de las compañías logísticas y las constantes del modelo se ajustan a los valores de la calibración empírica.

2. EL MEDIDOR DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Aunque hay muchos diseños disponibles de MDP, todos ellos se basan en rellenar de un flujo y descargar al mismo flujo un determinado volumen fijo de fluido [6]. El volumen medido en este flujo es el número de descargas (pulsos) multiplicado por un volumen fijo. Si se desea medir el flujo volumétrico de fluido, la ecuación fundamental es: Caudal = (Volumen fijo) \times (Frecuencia de pulsos) + Fugas. El dispositivo mecánico de rellenado y descarga suele ser una cámara giratoria. Para poder girar, la cámara de llenado debe tener holguras por donde se pierde una pequeña cantidad de caudal; se dice que hay un caudal de fugas o *slippage*.

El principio de funcionamiento se encuentra esquematizado en la figura 1. Una cámara giratoria de volumen fijo está representada por los cuatro álabes A, D, C y B. El caudal entra por la izquierda y va rellenando la cámara. Al comienzo, A cierra la cámara y B permite el paso del fluido [figura 1 (a)]. A continuación A pasa por la posición vertical [figura 1 (b)], pero los demás álabes no cierran el fluido hasta que B ocupa la posición inicial de A [figura 1 (c)]. En este momento hay un volumen definido que se transfiere al caudal cuando B está vertical [figura 1 (d)]. Se observa que, para poder girar, la base rotatoria de la cámara presenta un pequeño vano por donde hay un caudal de fugas.

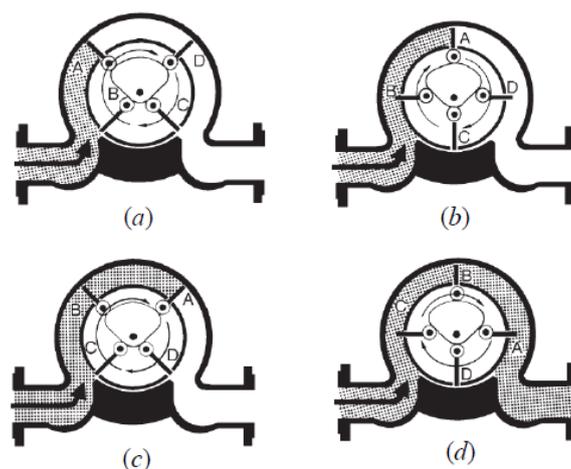


Figura 1. Principio de funcionamiento del medidor de desplazamiento positivo

El MDP que se ha descrito es del tipo “medidor de álabes deslizantes” y típicamente su exactitud es del 0,15 % [7], cumpliendo así con las exigentes especificaciones de la metrología legal. Esta clase de medidores presenta, no obstante, algunos inconvenientes: en caso de avería, pueden bloquear el caudal; se dañan por un cambio brusco del caudal; sufren desgastes y acumulaciones en las cámaras (derivás); el flujo de descarga es un tanto pulsado.

Las ventajas superan ampliamente a los inconvenientes por lo que, con ciertas precauciones, son los más usados en la logística de los hidrocarburos. Hay un rango de caudales para la operación; los caudales mayores dan lugar a grandes pérdidas y el equipo pierde su exactitud. Una buena práctica consiste en procurar que el uso sea a caudal constante o que éste fluctúe dentro de un margen estrecho.

Para corregir los errores sistemáticos debidos al caudal de fugas por el huelgo, slippage, se requiere la geometría del huelgo: sea ε el espesor del huelgo y λ su anchura; la superficie de la sección del huelgo será $\lambda \varepsilon$. El caudal de fugas no se ha contado, ya que no pasa por la cámara de medida. Debido a lo estrecho del huelgo, el flujo de slippage se mueve rozando con las paredes. Usando la fórmula de Poiseuille para el flujo laminar, la corrección es proporcional al gradiente de presión, el área del huelgo y el espesor al cuadrado; e inversamente proporcional a la viscosidad. Además debe tenerse en cuenta que una de las paredes se mueve, induciendo un flujo de oposición al de Poiseuille. Siguiendo a Baker [8], en el Apéndice se demuestra que la corrección es:

$$q_{\text{fugas}} = \frac{1}{12} \frac{(\nabla p)(\lambda \varepsilon)\varepsilon^2}{\mu} - \frac{U}{2} \lambda \varepsilon \quad (1)$$

donde q significa caudal; ∇p , el gradiente de presión entre la entrada y la salida del equipo; μ , la viscosidad dinámica del fluido; y U , la velocidad de la pared móvil. El modelo teórico de corrección requiere pues de ecuaciones adicionales para el cálculo del gradiente de presión.

El modelo teórico nos indica al menos que las correcciones a la medida dependen del caudal del fluido: a mayor caudal, mayor flujo de fugas. Dependen también de la viscosidad del hidrocarburo: un producto más viscoso requiere menor corrección por fugas; por último, depende de las dimensiones geométricas del huelgo. Hay que destacar que la temperatura es un factor que interviene en la corrección indirectamente: aumentos de temperatura dilatan el huelgo, dilatan la cámara de medida y disminuyen la viscosidad.

Las consideraciones anteriores ponen de manifiesto que la corrección teórica puede ser muy complicada, por lo que se prefiere una corrección empírica; donde caudal, viscosidad y temperatura sean las magnitudes que definan los puntos de calibración.

En la figura 2 (a) hay una imagen de un MDP real. El contador indica el número de pulsos, aunque puede sustituirse por un computador de caudal. En la figura 2 (b) se muestra también un MDP realizando una calibración en un cargadero de camiones cisterna.

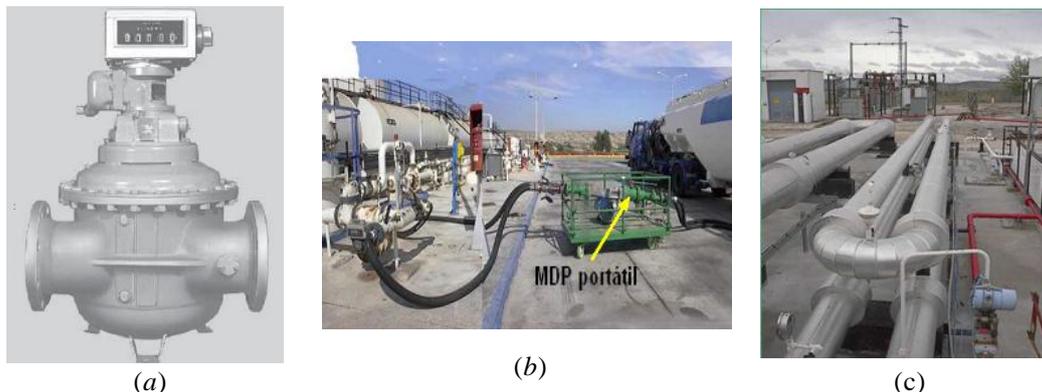


Figura 2. Medidor de desplazamiento positivo (a). Medidor utilizado in situ para calibrar un cargadero de camiones cisterna (b). Probador para calibrar medidores de desplazamiento positivo (c)

3. MODELO SEMIEMPÍRICO

Ante la complejidad del modelo teórico, se ha construido un modelo semiempírico, más adaptado a los usos de las compañías logísticas. Estas compañías no miden caudales sino volúmenes; en otras palabras, las medidas no contemplan el tiempo implícito en los caudales, siendo por ello medidas estáticas. Por tanto, el modelo debe referirse a los volúmenes en vez de a los caudales.

Si el volumen fijo de la cámara se ajustase a un barril de crudo por cada 1 000 pulsos, el volumen movido en un pulso sería 159 litros/1 000 = 0,159 litros. En general, cada equipo tiene una constante K , nominal, definida como la inversa del volumen en cada pulso. Refiriéndonos a un volumen medido que fuera el volumen del pulso, un medidor ideal tendría un meter factor unidad, y el volumen medido coincidiría con el volumen nominal del pulso V_p :

$$f_1 = KV_{\text{medido}} = \frac{V_p}{V_p} = 1 \quad (2)$$

Sin embargo, podría ocurrir que el valor nominal de la cámara no sea igual al valor real por las tolerancias constructivas. Entonces, el factor de corrección sería:

$$f_2 = \frac{V_p + \delta V_p}{V_p} = 1 + \frac{\delta V_p}{V_p} \quad (3)$$

donde δV_p es la corrección del valor nominal. Obsérvese que si $\delta V_p > 0$, el factor de corrección será mayor que la unidad. Significa que el volumen medido por los pulsos es menor que el real, y por tanto debe corregirse con un factor superior a la unidad.

Los volúmenes anteriores corresponden a la temperatura de referencia T_{ref} . La cámara puede dilatarse, si la medida se realizase a una temperatura arbitraria T ; con lo cual, el factor de corrección sería:

$$f_3 = \frac{(V_p + \delta V_p)[1 + \alpha_M(T - T_{\text{ref}})]}{V_p} \quad (4)$$

donde α_M es el coeficiente de dilatación cúbica del material con el que se ha construido la cámara de medida. Desarrollando algebraicamente la expresión (4) se llega a:

$$f_3 = a + cT ; a = f_2(1 - \alpha_M T_{\text{ref}}) ; c = f_2 \alpha_M \quad (5)$$

Finalmente, hay que considerar la corrección, δV_s , por el caudal de fugas (corrección por slippage):

$$f_4 = \frac{(V_p + \delta V_p)[1 + \alpha_M(T - T_{\text{ref}})] + \delta V_s}{V_p} \quad (6)$$

Se ha considerado que para medir el volumen real de fluido debe contemplarse el volumen δV_s que se fuga por cada pulso a través del huelgo. En el modelo teórico, el caudal de fugas, en primera aproximación, puede considerarse proporcional a la velocidad de rotación de la cámara y, por tanto, proporcional al caudal del fluido. Esto nos lleva a postular que el volumen fugado también será proporcional al caudal (Q):

$$\delta V_s = \tau_p Q \quad (7)$$

donde la constante de proporcionalidad τ_p tiene dimensiones de tiempo. La estructura detallada de τ_p es el objetivo del modelo teórico. En una primera aproximación, esta constante es inversamente proporcional a la velocidad del fluido a través del huelgo, y mediante esta magnitud se puede deducir una dependencia funcional con la viscosidad.

Dado que cada tipo de hidrocarburo tiene distinta viscosidad, en el modelo semiempírico se estima un factor de corrección para cada tipo, eliminando así la dependencia explícita con la viscosidad. Hay que considerar ahora que τ_p puede depender de la temperatura; puesto que, además de la viscosidad, depende de las dimensiones del huelgo y éstas se dilatan térmicamente. En nuestro modelo se postula una dependencia lineal:

$$\tau_p = \gamma_0 + \gamma_1 T \quad (8)$$

Si llevamos esta relación al cálculo (6) de f_4 , resulta:

$$f_4 = f_3 + (\gamma_0 + \gamma_1 T) \frac{Q}{V_p} \quad (9)$$

Denotando $b = \gamma_0/V_p$ y $d = \gamma_1/V_p$, tras algo de álgebra resulta:

$$f_4 = a + bQ + cT + dQT \quad (10)$$

Esta es la expresión definitiva del modelo. Debe aplicarse por separado a cada tipo de producto. Es semiempírica en el sentido de que las constantes a , b , c y d se obtienen por ajuste estadístico a las medidas empíricas de f_4 en diversas condiciones de caudal (Q) y temperatura (T). En la práctica, la ecuación (10) se emplea en un rango estrecho de temperaturas y caudales, por lo que el término cruzado QT puede despreciarse. Entonces, el modelo queda como:

$$f = a + bQ + cT \quad (10)$$

Los caudales se suelen medir en unidades de litros/min, y los rangos de operación suelen variar entre 1 000 y 3 000 litros/min. Las temperaturas se miden en grados Celsius; si se midieran en kelvin, simplemente cambiaría el término independiente de (10). Huelga recalcar que los parámetros a , b y c son característicos del equipo. Se obtienen empíricamente al calibrarse el medidor, definiendo así un equipo patrón, que se usa para calibrar in situ los equipos fijos en los cargaderos de las instalaciones de almacenamiento.

4. APLICACIÓN DEL MODELO

Siguiendo la norma API [9], los MDP se calibran con probadores (*provers*) que son instalaciones donde se conoce con exactitud el volumen de referencia que servirá de patrón

para la calibración [10]. Los provers están instrumentados con monitores de caudal, presión y temperatura. Se aplican para calibrar caudales relativamente grandes, superiores a 1 000 litros/min, y la incertidumbre en su volumen es inferior al 0,05 %. En la figura 2 (c) aparece una imagen de un probador típico.

Tras ser calibrado contra un prover, el MDP se emplea como patrón de trabajo para calibrar in situ los MDP de cargadero. Estos últimos dispensan hidrocarburo a los camiones cisterna en las instalaciones de almacenamiento.

Para su uso en los cargaderos, el modelo semiempírico (10) del patrón de trabajo toma la forma:

$$f_{T,Q} = f_{0,0} + b(Q - Q_0) + c(T - T_0) \quad (11)$$

donde Q_0 y T_0 son el caudal y la temperatura de referencia, y deben aplicarse por separado a cada tipo de producto. El meter factor en las condiciones de referencia, $f_{0,0}$, es el que se obtuvo contra el prover, mientras que $f_{T,Q}$ es el que debe usarse cuando el caudal y la temperatura de uso son Q y T .

Medidor	Producto	a	$b \times 10^{-6}$ (min/litro)	$c \times 10^{-5}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
18JA-54061	GNA	1,0045	1,45	6,18
	GOA	0,9975	1,06	8,22
	GOC	0,9977	1,08	7,22
	JET-A1	0,9990	1,50	3,16
18JA-54062	GNA	1,0017	1,31	1,29
	GOA	0,9983	0,81	6,81
	GOC	0,9979	0,79	9,65
	JET-A1	0,9974	1,61	10,20
18JE-55018	GNA	1,0028	0,95	7,50
	GOA	1,0011	0,90	4,64
	GOC	1,0014	0,88	3,47
	JET-A1	1,0020	0,46	8,90
18JE-55023	GNA	1,0006	1,04	5,54
	GOA	0,9988	0,59	7,87
	GOC	0,9991	0,65	4,87
	JET-A1	0,9989	1,01	6,33
18JA-540555	GNA	1,0002	1,08	8,63
	GOA	0,9988	0,29	7,62
	GOC	0,9986	0,39	7,80
	JET-A1	0,9983	0,98	8,43

Tabla 1. Parámetros del modelo semiempírico para cinco medidores

El modelo (10) se ha aplicado a 25 MDP iguales (marca Smith Meter, modelo LF4) calibrados con cuatro tipos de hidrocarburo: gasolina (GNA), gasóleos A (GOA) y C (GOC), y queroseno de aviación (JET-A1). Las constantes del modelo, distintas para cada equipo y tipo de hidrocarburo, se han obtenido por medio de ajustes estadísticos; usando los datos provenientes de las calibraciones realizadas con el probador y aplicando los caudales nominales: 1 000, 1 500, 2 200, 2 500 y 3 000 litros/min.

Cada ajuste correspondiente a un equipo e hidrocarburo ha requerido los datos de un promedio de cinco calibraciones sucesivas, procedentes de un histórico que cubre desde 1999 hasta 2008. Cada ajuste se ha realizado mediante un plano de regresión, tomando como variables independientes los caudales y las temperaturas, y como variable dependiente el meter factor. La desviación típica residual (incertidumbre del modelo) ha sido inferior al 0,09 %, con un nivel de confianza del 95 %.

En la tabla 1 aparecen los resultados de 5 de los 25 MDP estudiados. El parámetro a es un valor del mismo orden de magnitud que el meter factor de referencia, pero no es práctico obtener éste en función de aquél. En efecto, de (10) y (11) se tiene que $f_{0,0} = a + bQ_0 + cT_0$. La constante b tiene dimensiones inversas del caudal. Suponiendo que en los cargaderos éste sea 2 200 litros/min con una tolerancia del 10 %, el factor de calibración queda afectado por

esta corrección más allá de la cuarta cifra decimal. Por último, la constante c tiene dimensiones inversas de la temperatura, pero la de referencia y la de uso pueden diferir, típicamente, hasta 20 °C, por lo que la corrección afecta a la cuarta cifra decimal (a veces a la tercera).

Aún se puede simplificar la aplicación práctica en los cargaderos, donde se deja fijo el caudal nominal. La temperatura no se puede fijar, pues viene determinada por factores ambientales y las condiciones de almacenamiento y dispensación del hidrocarburo. Un valor medio del coeficiente c para gasolina sería pues $5 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, lo que permitiría hacer una primera corrección sin especificar el equipo.

5. CONCLUSIONES

La exactitud en la transferencia de custodia de los hidrocarburos líquidos refinados (gasolinas, gasóleos y querosenos) es un requerimiento esencial, sujeto a metrología legal. Los MDP son los equipos adecuados para la transferencia de custodia, pero se calibran en unas condiciones y se usan en otras. Las medidas se expresan en pulsos, y deben multiplicarse por el volumen nominal de la cámara de los MDP.

Las correcciones a estas medidas se llevan a cabo mediante un factor f que depende del caudal, la viscosidad y la temperatura del hidrocarburo. Las correcciones obtenidas matemáticamente no resultan prácticas a las compañías logísticas, por lo que se han sustituido por un modelo semiempírico. El modelo se aplica por separado a cada tipo de producto, y el término no lineal es en general despreciable, dado que los rangos de aplicación son estrechos.

Las constantes del modelo se han obtenido por medio de ajustes estadísticos, usando los datos provenientes de los probadores. Son distintas en cada equipo y tipo de hidrocarburo. Las correcciones afectan a la tercera cifra decimal del factor; esto da una idea de la precisión de las medidas de volumen durante la transferencia de custodia de hidrocarburos. La gran utilidad del modelo semiempírico es que un MDP patrón, calibrado contra un prover a cierto caudal y temperatura, se puede utilizar para calibrar in situ los MDP de cargadero aunque los caudales y las temperaturas in situ no coincidan con aquellos a los que se calibró el MDP patrón.

6. APÉNDICE: DEDUCCIÓN DE LA CORRECCIÓN POR SLIPPAGE

Para corregir las medidas por el caudal de fugas, asimilamos el huelgo por un paralelepípedo de altura L , anchura λ , y espesor ε (figura 3). La altura L equivale a un cuarto de la circunferencia del recorrido del líquido desde que entra hasta que sale del equipo. La sección de este canal de fugas será $\lambda\varepsilon$. Debido a la viscosidad el líquido fluye con rozamiento, especialmente con las paredes del canal de fugas. El rozamiento se traduce en una pérdida de presión por unidad de longitud entre la entrada y la salida del canal. La corrección de Baker [8] considera que el flujo viscoso es un término que se resta a un supuesto flujo nominal no viscoso. La deducción que sigue sólo considera el flujo debido al rozamiento.

Este flujo se estima como un flujo laminar suponiendo que $\lambda \gg \varepsilon$. En estas condiciones se supone que el rozamiento sólo afecta al perfil de velocidad a lo largo del espesor, que denominaremos dirección z (figura 3). Se desprecia el efecto de la viscosidad en todas las restantes direcciones. En estas condiciones, el gradiente de presión es la fuerza que impulsa al fluido y el rozamiento la fuerza de oposición. Al igualar estas fuerzas, no hay aceleración pero resulta un perfil de velocidades en la dirección z , tal que la velocidad en los bordes es nula: $v(\pm\varepsilon/2) = 0$. Igualando ambas fuerzas en la sección marcada en la figura 3, resulta:

$$-(\Delta p)2\lambda z = -\mu \frac{dv}{dz} [2L(\lambda + 2z)]$$

siendo Δp la diferencia de presión entre la salida y la entrada (negativa). Obsérvese en la figura 3 que $[2L(\lambda + 2z)]$ es el área lateral por donde el fluido sufre el rozamiento debido a la viscosidad, caracterizada por el coeficiente μ .

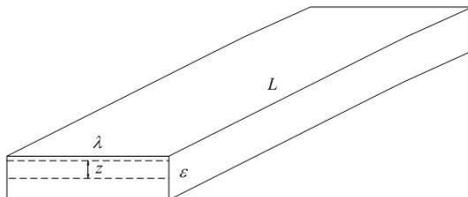


Figura 3. Geometría del canal de slippage

Reagrupando términos y haciendo uso de $z \ll \lambda$, se obtiene la ecuación diferencial:

$$-\frac{dv}{dz} = \frac{\nabla p}{\mu} \left(\frac{z}{1 + 2z/\lambda} \right) = \frac{\nabla p}{\mu} z \left(1 - \frac{2z}{\lambda} \right); v(\pm \epsilon/2) = 0$$

donde $\nabla p = -\Delta p/L$ (gradiente de presión entre la entrada y la salida del equipo). Integrando la ecuación, aplicando la condición de contorno y volviendo a usar $z \ll \lambda$, resulta el perfil parabólico de velocidades, semejante al de la ley de Poiseuille:

$$v(z) = \frac{\nabla p}{2\mu} \left(\frac{\epsilon^2}{4} - z^2 \right)$$

La viscosidad tiene otro efecto a considerar: una parte del fluido se adhiere a la parte móvil del huelgo y por tanto tiene su misma velocidad U ; en la otra pared del huelgo, la velocidad es nula. Hay un perfil lineal de velocidades por este efecto. La velocidad causada por el gradiente de presión debe corregirse por este efecto de una pared móvil, resultando:

$$v(z) = \frac{\nabla p}{2\mu} \left(\frac{\epsilon^2}{4} - z^2 \right) - U \left[\frac{z + (\epsilon/2)}{\epsilon} \right]$$

Integrando esta velocidad, se obtiene el caudal correspondiente: $\frac{1}{12} \frac{\lambda \nabla p}{\mu} \epsilon^3 - \frac{\lambda U}{2} \epsilon$. Obsérvese

que al aumentar la viscosidad, disminuye el caudal de fugas. Los cambios de temperatura influyen en la dilatación del huelgo, cambiando los valores de λ y ϵ .

7. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Industria, *Boletín Estadístico de Hidrocarburos*, Vol. 168, Cap. 2, (2011).
- [2] G. Hratch *et al*, *Impact of measurement and standards infrastructure on the national economy and international trade*, Measurement, Vol. 27 (2000), 179-196.
- [3] Real Decreto 889/2006, *de control metrológico del Estado*, BOE núm. 183, (2006).
- [4] J.E. Gallager *et al*, *Custody transfer metering performance for turbine and positive displacements meters on batched crude oil pipelines*, Third International symposium on fluid flow measurements, San Antonio, Texas, (1995).
- [5] M.C. Rhoades, *Meter factor variations and factors affecting the accuracy of positive displacements meters*, Journal of Petroleum Technology, (1964).
- [6] R.C. Baker, *An introductory guide to flow measurement*, Professional Engineering Publishing Limited, (2002).
- [7] K.F.A. Wallis, *The long term repeatability of positive displacements liquid flow meters*, Conf. on Fluid Flow Measurements in the Mid 1970s, East Killbride, Scotland, (1975).
- [8] R.C. Baker, *Flow measurement handbook*, Cambridge University Press, (2000).
- [9] API MPMS, *Calculation of Petroleum Quantities using Dynamic Measurement Methods and Volumetric Correction Factors*, American Petroleum Institute, (1999).
- [10] API MPMS, *Master Meter Provers, Manual of Petroleum Measurement Standards*, American Petroleum Institute, (2000).