

DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD

I.1.INTRODUCCIÓN

La viscosidad es la propiedad que tienen los fluidos de ofrecer resistencia al movimiento relativo de sus moléculas. También se suele definir la viscosidad como una propiedad de los fluidos que causa fricción, los cuales ofrecen resistencia a los gradientes de velocidad, esto da origen a la pérdida de energía en el flujo fluido. Todos los fluidos conocidos presentan algún nivel de viscosidad, el hipotético fluido sin viscosidad (es decir, con viscosidad nula) se conoce como fluido ideal (MARKLAND, 1994, p17).

La viscosidad es la resistencia que presenta un fluido a ser transportado de un punto a otro, conocer el coeficiente de viscosidad de fluidos como: aceite, pintura, productos lácteos, bebidas, tintes, pastas, cremas, entre otros; es de vital importancia a la diseñar medios y formas para su transporte, como la elección de tuberías y bombas.

La viscosidad de los fluidos se mide a través del coeficiente de viscosidad, un parámetro que depende de la temperatura. Se ha comprobado que a mayor temperatura disminuye el valor de la viscosidad y viceversa.

La unidad en la que se mide la viscosidad es el centipoise y es la más usada debido a que el agua tiene una viscosidad de 1,0020 cP a 20 °C.

$$1 \text{ poise} = 100 \text{ centipoise} = 1 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s}) = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$1 \text{ centipoise} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

La ley de Stokes es el principio usado en los viscosímetros de bola en caída libre, en los cuales el fluido de estudio está estacionario en un tubo vertical de vidrio, se deja caer una esfera de tamaño y densidad conocidas dentro del fluido, registrando el tiempo que toma la esfera en recorrer una distancia, con estos dos datos se puede calcular la velocidad de caída de dicha esfera (CABRERIZO, 2008, p48).

Algunas de las aplicaciones de la ley de Stokes en la ingeniería es la determinación de la velocidad con la cual las partículas se sedimentan en un desarenador, para determinar el porcentaje de granulometría fina de un suelo mediante el ensayo de sedimentación, para conocer la velocidad límite de un paracaidista que desciende en caída libre, para explicar el por qué las gotas se encuentran en suspensión y como se precipita en forma de lluvia.

Existen diversos métodos para la determinación de la viscosidad, uno de los más utilizados en el viscosímetro rotacional, su funcionamiento se basa en la rotación de una aguja o cilindro dentro del material de prueba. El dial del instrumento esta graduado de manera tal que la lectura, multiplicada por el factor indicado en las tablas provistas con el aparato, da la lectura directamente en centipoise (cps), (PÉREZ E., 2008, p4).

El aparato está accionado por un motor sincrónico de baja velocidad y alto torque. El mecanismo del tren de engranaje permite diferentes aumentos de cizalla con lo que podemos medir un amplio intervalo de viscosidad con el mismo instrumento. Materiales no newtonianos (Tixotrópicos, dilatantes, plástico) pueden ser medidos a diferentes valores de cizalla, fácil y rápidamente, cambiando la aguja, o la velocidad, o ambos (PÉREZ E., 2008, p4).

Los viscosímetros rotacionales son útiles en un amplio intervalo de viscosidades y particularmente valiosos para el estudio de sistemas no newtonianos. Normalmente se emplean en el campo superior a 50 poises, aunque su uso es satisfactorio aun en los gases (RUIZ R., 2006, p3).

I.2.OBJETIVO

- Determinación del coeficiente la viscosidad de diferentes fluidos por medio de la ley de Stokes y el viscosímetro Brookfield.
- Comparar los valores de viscosidad determinados con diferentes métodos.

I.3.EQUIPO



Fig. 1 Viscosímetro Brookfield

Tomadode:http://www.alemmar.com.br/arquivos/%7B6E96BA40-CF1A-4A8E-867F-625CC3540D23%7D_Dial.pdf

Otros elementos

- Utensilios de laboratorio: vaso de precipitados, tubo de ensayo, flexómetro, balanza digital, 3 esferas de acero.
- Fluidos problema (Aceite, champú, miel, agua)
- Cronómetro
- Picnómetro
- Termómetro

I.4.MARCO TEÓRICO

Al desplazarse un sólido en el interior de un fluido aparece una fuerza resultante llamada de resistencia hidrodinámica, que tiene dos componentes una anti-paralela al movimiento, debida a las fuerzas viscosas (resistencia) y otra perpendicular al flujo denominada fuerza de sustentación. Las dos componentes son función de la velocidad relativa del sólido/fluido de la superficie proyectada en la dirección al movimiento, A_p y perpendicular a él, A_r , y de las características físicas del fluido (RAMOS M., 2004, p5).

Ley de Stokes: velocidad límite

Condición de equilibrio dinámico:

Si consideramos un cuerpo que cae libremente en el seno de un fluido, al cabo de cierto tiempo, cuando el peso sea equilibrado por la fuerza $\vec{R}$ y por la fuerza de empuje de Arquímedes $\vec{E}$, habrá adquirido una velocidad constante $\vec{V} = \vec{V}_{limite}$, llamada velocidad límite (RAMOS M., 2004, p7).

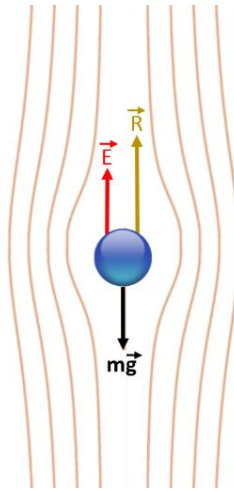


Fig. 2 Diagrama de cuerpo libre de una esfera en caída en el seno de un fluido

Fuente: Propia

Del diagrama de cuerpo libre se observa que la fuerza de empuje y la resistencia hidrodinámica es igual a la fuerza gravitacional.

$$\vec{E} + \vec{R} - m\vec{g} = 0$$

$$m\vec{g} = \vec{E} + \vec{R} \quad (1)$$

Resistencia Hidrodinámica $\vec{R}$

La fuerza debida a la resistencia hidrodinámica presenta una componente de resistencial rozamiento, muy intensa en el caso de los líquidos y que genera accionestangenciales sobre el cuerpo en movimiento. Por otro lado, aparecen las

fuerzas de presión que se presentan en diferentes zonas del líquido para dar paso al sólido en su seno (RAMOS M., 2004, p4).

Se puede expresar el comportamiento de la fuerza de resistencia hidrodinámica en función de la velocidad relativa del movimiento del sólido en el interior del líquido, para velocidades pequeñas se tiene que:

$$\vec{R} \propto \vec{V}$$

Y para grandes velocidades, se tiene:

$$\vec{R} \propto \vec{V}^2$$

El componente de la resistencia es la fuerza paralela al flujo del fluido, debida a las fuerzas disipativas y tangenciales de fricción viscosa. El componente de resistencia es función del tipo de flujo (laminar o turbulento), de las características físicas del fluido, de la velocidad del sólido respecto del fluido y del área de sección transversal del objeto en movimiento:

$$\vec{R} = C_R \rho \frac{\vec{V}^2}{2} A_R \quad (2)$$

Donde

$\vec{R}$ Componente de resistencia.

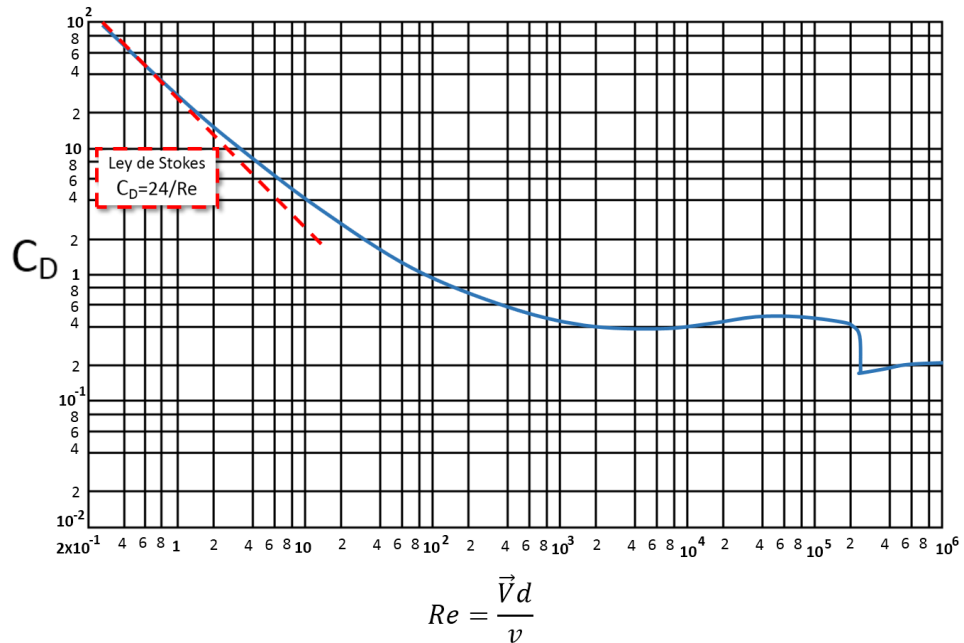
C_R Coeficiente de resistencia hidrodinámica.

ρ Densidad del fluido.

$\vec{V}$ Vector de velocidad.

A_R Área de la sección transversal del sólido en movimiento en el seno del fluido.

Existe una relación entre el componente de resistencia y el número de Reynolds, se cumple que para régimen laminar $Re < 1$, el coeficiente de resistencia hidrodinámica $C_R = 24/Re$, que es el sector donde la Ley de Stokes se cumple completamente, como se aprecia en la gráfica 1, en donde se encuentran los datos experimentales de los coeficientes de arrastre en función del número de Reynolds (CABRERIZO M., 2008, p48).



Grafica 1. Coeficiente de resistencia al avance de una esfera lisa axialmente simétrica

Adaptado de: Análisis Experimental, Jorge Cifuentes

Remplazando el valor del coeficiente de resistencia hidrodinámica $C_R = 24/Re$ en la ecuación 1 se tiene,

$$R = \left(\frac{24}{Re}\right) \rho \frac{\vec{V}^2}{2} A_R$$

$$R = \frac{12\rho\vec{V}^2 A_R}{Re}$$

El área de la sección transversal del sólido en movimiento en el seno del fluido es una esfera, por lo que se obtiene.

$$A_R = \pi r^2$$

$$R = \frac{12\rho\vec{V}^2(\pi r^2)}{Re}$$

El número de Reynolds es una relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas dentro de un fluido en movimiento, en donde interviene la densidad, la velocidad, el diámetro y la viscosidad, conociendo esto se tiene,

$$Re = \frac{\rho \vec{V} D}{\mu}$$

Puesto que el diámetro de la esfera es 2 veces el radio,

$$Re = \frac{\rho \vec{V} (2r)}{\mu}$$

Y por último remplazando el número de Reynolds en la ecuación 1, se tiene el valor de la fuerza de resistencia hidrodinámica en función de la velocidad relativa del movimiento del sólido en el interior del líquido.

$$R = \frac{12\rho \vec{V}^2 (\pi r^2)}{\left[\frac{\rho \vec{V} (2r)}{\mu} \right]}$$

$$R = 6\pi r \vec{V} \mu \quad (3)$$

Ley de Arquímedes: Flotabilidad o Empuje $\vec{E}$

El principio de Arquímedes es un principio físico que afirma que un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido estático, será empujado con una fuerza igual al peso del volumen de fluido desplazado por dicho objeto. De este modo cuando un cuerpo está sumergido en el fluido se genera un empuje sobre la superficie del cuerpo que actúa siempre hacia arriba a través del centro de gravedad del cuerpo del fluido desplazado y de valor igual al peso del fluido desplazado (DOMINGO A., 2011, p21).

$$\vec{E} = \rho g \forall \quad (4)$$

Donde

$\vec{E}$ Fuerza debida al empuje [N].

ρ Densidad del fluido [kg/m³].

g Aceleración de la gravedad [m/s²].

$\forall$ Volumen de la esfera [m³].

Conociendo que el volumen de la esfera es,

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Se tiene la fuerza de empuje en función densidad y el volumen del objeto sumergido,

$$\vec{E} = \rho g \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \right) \quad (5)$$

Por otra parte el cálculo del peso de un cuerpo a partir de su masa se puede expresar mediante la segunda ley de la dinámica:

$$F = m\vec{a} \quad (6)$$

que es igual, a la masa del objeto por la constante gravitacional,

$$F = mg$$

y la masa se puede expresar en función de la densidad del objeto y su volumen así,

$$m = \delta * V$$

Reemplazando,

$$F = (\delta * V)g$$

Conociendo que el volumen de la esfera es,

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Obteniendo por último la fuerza generada por la gravedad en función de la densidad y el volumen del objeto.

$$mg = \left(\delta * \left[\frac{4}{3}\pi r^3 \right] \right) g \quad (7)$$

De la Fig. 2 que muestra el diagrama de cuerpo libre de una esfera en el seno de un fluido se observa que la fuerza de empuje y la resistencia hidrodinámica es

igual a la fuerza gravitacional, demostración matemática observada en la ecuación 1,

Reemplazando las ecuaciones 3, 5 y 7 en la ecuación 1 se obtiene la ecuación para encontrar el valor de la viscosidad del fluido en función de la densidad del fluido, el radio y la velocidad que toman las esferas dentro del seno del fluido estudiado,

$$\left[\left(\delta * \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \right) g \right] = \left[\rho g \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \right] + [6 \pi r \vec{V} \mu]$$

$$\mu = \frac{2r^2 g (\delta - \rho)}{9 \vec{V}} \quad (8)$$

Recordando que esta fórmula solo es válida para $Re \leq 1$.

Donde

μ Viscosidad [Pascal×s].

δ Densidad de la esfera [Kg/m³].

ρ Densidad del fluido [Kg/m³].

r Radio de la esfera [m].

g Aceleración de la gravedad 9.81 [m/s²]

$\vec{V}$ Velocidad de la esfera [m/s].

I.5.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD POR MEDIO DE LA LEY DE STOKES

Utilizar el picnómetro y la balanza electrónica para encontrar la densidad de cada líquido, el picnómetro permite mantener un volumen fijo al colocar diferentes líquidos en su interior, es necesario registrar el peso del picnómetro vacío y luego registrar su peso con cada líquido en su interior, se obtendrá el valor de la densidad al dividir el valor del peso del líquido por el volumen conocido del picnómetro.



Fig. 3 Picnómetro

Fuente: <http://docencia.udea.edu.co/cen/tecnicaslaboratorio/02practicas/practica03.htm>

Con la ayuda del vaso de precipitados y la balanza electrónica encontrar la densidad de las esferas, tendrá que calcular el volumen de la esfera con la ayuda del pie de rey, es necesario registrar el peso de cada una de las esferas, se obtendrá el valor de la densidad al dividir el peso de cada esfera por el volumen calculado de la esfera, tendrá que obtener un valor promedio de estas tres densidades, adicionalmente tendrá que comparar este valor con el valor teórico de la densidad del acero registrado en la literatura.



Fig. 4 Pie de rey y esfera de trabajo

Fuente: Propia

Llenar el tubo ensayo con el primer líquido a ensayar. Es necesario medir la temperatura a la que se encuentra cada líquido a ensayar, esto se logra con la ayuda de un termómetro, es importante monitorear y registrar constantemente la temperatura, puesto que ante pequeños deltas de temperatura se pueden producir cambios significativos en la viscosidad.

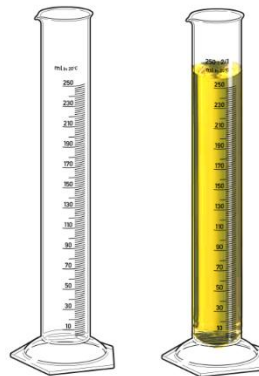


Fig. 4 Tubo de ensayo con fluido

Fuente: Propia

Con la ayuda del flexómetro medir y marcar en el tubo de ensayo la distancia a recorrer por las esferas.

Dejar caer cada esfera y medir con el cronómetro el tiempo que tarda en recorrer la distancia marcada. Con estos datos, calcular la velocidad de caída de cada una.

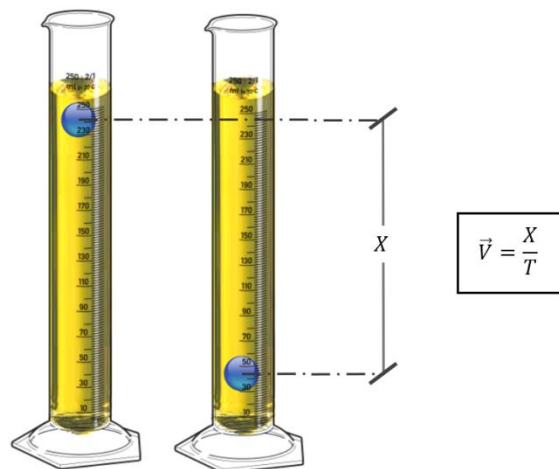


Fig. 3 Tubo de ensayo y esferas en el seno del fluido

Fuente: Propia

Donde:

$\vec{V}$ Velocidad de la esfera

X Distancia

T Tiempo que le tomo a la esfera recorrer la distancia X .

Llenar la tabla con estos datos y repetir este proceso para cada fluido.

DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD POR MEDIO DE LA DEL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD

- Preparación del Viscosímetro y fluidos de muestra

Asegúrese que el viscosímetro Brookfield se encuentra bien conectado a la fuente de alimentación.

Existe un control de velocidades, es un interruptor goma negro el cual controla el motor y tiene tres posiciones:

ARRIBA: Off - Enciende el motor y detiene el dial de giro.

MEDIO: On - hace que el dial gire a la velocidad seleccionada.

ABAJO: Pausa o detención del motor.

Los modelos de viscosímetro LV utilizan un conjunto de cuatro husillos y una pierna guardia estrecha; los modelos de viscosímetro RV utilizan un conjunto de siete ejes o husillos y una pierna guardia más amplia; Los modelos de viscosímetros HA y HB utilizan un conjunto de siete husillos y no poseen pierna de guardia (Manual Brookfield, p6).



Fig. 4 Patas guardia RV y LV

Tomado de: <http://www.viscometers.org/PDF/Manuals/laboratory/DIAL.PDF>

Las velocidades (en rpm) pueden ser cambiados girando la perilla negra (a la izquierda o derecha) a la velocidad deseada.

La palanca del embrague, al ser oprimida, planta el dial contra el puntero rojo y sostiene la lectura viscosímetro, al soltar el embrague se libera el puntero indicador.

Monte la pata de guardia (LV) en el viscosímetro junto con el husillo seleccionado y luego centre el viscosímetro sobre el material de prueba.

Tenga cuidado de no atrapar burbujas de aire bajo la pata de guardia y el husillo. Coloque husillo dentro de la muestra, teniendo cuidado de no tocar las paredes, ni el fondo del contenedor.

Toma de lecturas y cálculo de viscosidad

- Seleccione la velocidad deseada.
- Gire el interruptor del motor Viscosímetro a la posición ON.
- Deberá transcurrir un determinado tiempo para que la lectura indicada se estabilice; este tiempo puede variar, dependiendo de su líquido ensayado. Se recomienda un mínimo de 5 vueltas antes de tomar cualquier lectura.
- Para tomar una lectura, presione la palanca del embrague y manténgalo hacia abajo. Con la palanca todavía abajo, mueva el interruptor del motor a la posición "Off" o "Pausa". Ajuste la posición de marcación (Ventana de medición del viscosímetro), si es necesario, para permitir que la aguja roja que aparezca en la ventana del viscosímetro.
- Registre la lectura que indica el puntero rojo en el dial: este número se conoce como % de torque.
- Para convertir el % de torque a una lectura de la viscosidad en centipoises (cP), multiplique la lectura de línea por el factor apropiado para el husillo y la velocidad en uso.
- Para obtener la máxima precisión no tome lecturas por debajo de torque del 10% del torque.
- No haga funcionar el viscosímetro durante largos períodos de tiempo en un % torque superior al 100%.
- Ponga el motor a la posición Off al cambiar los ejes y las muestras.
- Limpie los husillos y las patas guardianes antes de cambiar de muestra y antes de guardar el equipo.

Por ejemplo, un fluido ensayado con un spindle (husillo) número 1 LV (pierna guardia estrecha), a una velocidad de 6 rpm, arrojo un % de torque de 75, para encontrar el valor de la viscosidad es necesario usar la tabla número 1, para encontrar

el factor por el que se tiene que multiplicar el % de torque para hallar dicho valor. Utilizando un husillo numero 1 y a una velocidad de 6 rpm se tiene un factor de 10, por consiguiente se obtiene la viscosidad en cP.

$$\text{Viscosidad dinámica } \mu = 75 * 10 = 750 \text{ cP} = 75 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

LV Series Viscometer							
1		2		3		4	
0.3	200	0.3	1K	0.3	4K	0.3	20K
0.6	100	0.6	500	0.6	2K	0.6	10K
1.5	40	1.5	200	1.5	800	1.5	4K
3	20	3	100	3	400	3	2K
6	10	6	50	6	200	6	1K
12	5	12	25	12	100	12	500
30	2	30	10	30	40	30	200
60	1	60	5	60	20	60	100

☐ = Spindle

☐ = Spindle Speed

☐ = Factor

K = 1000

Tabla 1: Factores de conversión para viscosímetro LV

http://www.utwente.nl/tnw/onderwijs/practica_tnw/doc/apparatuur/diversen/brookfield_viscometer_analoog.pdf

RV Series Viscometer											
1		2		3		4		5		6	
0.5	200	0.5	800	0.5	2K	0.5	4K	0.5	8K	0.5	20K
1	100	1	400	1	1K	1	2K	1	4K	1	10K
2	50	2	200	2	500	2	1K	2	2K	2	5K
2.5	40	2.5	160	2.5	400	2.5	800	2.5	1.6K	2.5	4K
4	25	4	100	4	250	4	500	4	1K	4	2.5K
5	20	5	80	5	200	5	400	5	800	5	2K
10	10	10	40	10	100	10	200	10	400	10	1K
20	5	20	20	20	50	20	100	20	200	20	500
50	2	50	8	50	20	50	40	50	80	50	200
100	1	100	4	100	10	100	20	100	40	100	100

☐ = Spindle

☐ = Spindle Speed

☐ = Factor

K = 1000

Tabla 1: Factores de conversión para viscosímetro RV

Tomado de:

http://www.utwente.nl/tnw/onderwijs/practica_tnw/doc/apparatuur/diversen/brookfield_viscometer_analoog.pdf

I.5.DATOS, OBSERVACIONES Y RESULTADOS

- Calcular la densidad de cada uno de los fluidos ρ y la densidad de las esferas δ .
- Obtener la velocidad de caída de cada una de las esferas dentro del seno del fluido.
- Registrar la temperatura de cada uno de los fluidos.
- Encontrar el valor de la viscosidad dinámica μ para cada fluido utilizando la ecuación 8.
- Llenar las tablas utilizando 4 líquidos diferentes.
- Comparar los resultados obtenidos con los datos existentes en la literatura.
- Compare los resultados de la viscosidad hallados por ambos métodos y determine el valor de error, tomando como valor verdadero el valor de la viscosidad hallado con el viscosímetro.

I.6.ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

- Explique como la temperatura a la que se encuentra el fluido interviene en el valor de la viscosidad.
- ¿Cómo interviene el número de Reynolds en el valor de la viscosidad?
- ¿Existe alguna diferencia en la velocidad de caída de un objeto si se cambia la forma del objeto que se encuentra en el seno del fluido?
- Averigüe cómo funcionan los viscosímetros capilares (Viscosímetro Ostwald, Ubbelohde y de flujo inverso).
- Explique que son los fluidos Newtonianos y qué relación tienen con la viscosidad.
- Liste las posibles fuentes de error y calcule la expresión para calcular la propagación del error en el valor de viscosidad derivado de las mediciones del radio, velocidad de caída, densidad del fluido y la densidad de las esferas.

I.7.HOJA DE RESULTADOS

Nombre del Fluido	Tempe. °C	Volumen del picnómetro (m^3)	Peso del picnómetro vacío W_p (Kg)	Peso del picnómetro con fluido W_{p+f} (Kg)	Peso del fluido $W_f = W_{p+f} - W_p$ (Kg)	densidad del fluido $\rho = W_f/V$ (Kg/ m^3)
1						
2						
3						
4						

	Diámetro de la esfera ϕ (m)	Radio de la esfera r	Peso de la esfera W_E (Kg)	Volumen de la esfera V_E (m^3)	densidad de la esfera $\delta = W_E/V_E$ (Kg/ m^3)
1					
2					
3					
	$\bar{r}$ Promedio			$\bar{\delta}$ Promedio	

Fluido 1:

Temperatura:

Esfera	distancia (m)	Tiempo (s)	velocidad (m/s)
1			
2			
3			
Promedio			

Fluido 2:

Temperatura:

Esfera	distancia (m)	Tiempo (s)	velocidad (m/s)
1			
2			
3			
Promedio			

Fluido 3:
Temperatura:

Esfera	distancia (m)	Tiempo (s)	velocidad (m/s)
1			
2			
3			
Promedio			

Fluido 4:
Temperatura:

Esfera	distancia (m)	Tiempo (s)	velocidad (m/s)
1			
2			
3			
Promedio			

I.8.BIBLIOGRAFÍA

PÉREZ, E., (2008). Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. Escuela de Biología. Departamento de Tecnología de Alimentos. Recuperado: <http://www.ciens.ucv.ve:8080/generador/sites/mmedina/archivos/Practica4.pdf> Fecha de recuperación: 9 de agosto de 2013.

MARKLAND, E. (1994) "A first course in Hydraulics" by Emeritus Professor E. Markland, Published by TecQuipment Limited, 1994.

Brookfield dial viscometer, operating instructions. Recuperado de: <http://www.viscometers.org/PDF/Manuals/laboratory/DIAL.PDF> Fecha de recuperación: 05/07/2014

RUIZ R. (2006), Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Universidad Autónoma

Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Recuperado: http://cbi.izt.uam.mx/iq/lab_mec_de_fluidos/Practicas%20Laboratorios/PRACTICA2.pdf Fecha de recuperación: 12 de agosto de 2014.

CABRERIZO M. (2008). Practica 9: Medida de la viscosidad por el método de Stokes. Practicas Técnicas experimentales básicas, Departamento de Física aplicada de la Universidad de Granada - España. Recuperado: <http://www.ugr.es/~andyk/Docencia/TEB/PracTEB.pdf> Fecha de recuperación: 2 de octubre de 2014.

RAMOS M., (2004). Movimiento de sólidos en Fluidos: Sedimentación. Física Ambiental. Universidad de Alcalá (UAH) - Madrid. Recuperado de: http://www2.uah.es/gifadocumentos/FA/Transparencias_FA/tema8_fa.pdf Fecha de recuperación: 18 de octubre de 2014.

DOMINGO A., (2011) Apuntes de mecánica de fluidos. Recuperado de: <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf> Fecha de recuperación: 23 de junio de 2014.