MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TÍTULO: DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE VISCOSIDADE UTILIZANDO O MÉTODO DE STOKES

1 - Objetivo

Determinar experimentalmente a viscosidade de diferentes fluidos através do método proposto por Stokes.

2 – Fundamentos Teóricos

Quando um corpo se move no interior de um meio viscoso, ele é submetido à ação de diferentes forças, tais como: força de arrasto ou viscosa (F_a), força de empuxo (E) e a força peso (P) (Figura 1).

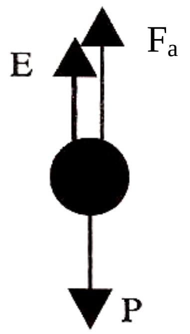

Figura 1 – Forças que agem sobre um corpo em movimento no interior de um meio viscoso.

a)Força de arrasto ou força viscosa atuando sobre uma esfera (F_a)

Isaac Newton desenvolveu a equação geral para a força resistente, que deve atuar sobre uma esfera que se move através de um gás, enquanto investigava o movimento de uma bala de canhão. Newton estabeleceu teoricamente que a esfera deve empurrar um volume de gás igual a área projetada da esfera multiplicada pela sua velocidade, de acordo com a Equação 1.

$$F_a = \frac{1}{2} C_D \rho_f A v^2 \qquad (1)$$

sendo C_D [-], ρ_f [kg/m^3], A [m^2] e v [m/s] o coeficiente de arrasto, a densidade do fluido, a área projetada da esfera e a velocidade de queda da esfera, respectivamente.

No caso de esferas em velocidades baixas (**regime de Stokes**), o coeficiente de arrasto pode ser representado por:

$$C_D = \frac{24}{R_e} = \frac{24\mu}{Dv\rho_f} \qquad (2)$$

sendo *Re* [-], *D* [m] e μ [kg/(m.s)] o número adimensional de Reynolds, o diâmetro da esfera e a viscosidade dinâmica do fluido, respectivamente.

Considerando a área projetada da esfera $A=\pi R^2$, sendo *R* [m] o raio da esfera, e substituindo a Equação 2 na Equação 1, tem-se a expressão para a força de arrasto ou viscosa (Equação 3):

$$F_a = 6\pi\mu Rv \qquad (3)$$

b) Força de empuxo (*E*)

De acordo com o principio de Arquimedes (sobre a flutuação dos corpos), uma força de empuxo atua sobre qualquer corpo imerso em um líquido e é igual ao peso do volume de líquido deslocado pelo corpo. O empuxo exercido sobre uma esfera completamente imersa em um líquido é calculado pela expressão:

$$E = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_f g \qquad (4)$$

sendo g [m/s^2] a aceleração da gravidade.

c) Força Peso (*P*)

A força peso é dada pelo produto da massa pela aceleração da gravidade *g*. Visto que a massa da esfera pode ser expressa pelo produto do seu volume pela sua densidade, tem-se:

$$P = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_e g \qquad (4)$$

sendo ρ_e [kg/m^2] a densidade da esfera.

Equilíbrio das forças

Observa-se que a velocidade de queda da esfera aumenta com o tempo até atingir um valor limite, conhecida como velocidade terminal teórica ($v_t^{teórica}$), que ocorre quando a força resultante for nula. No momento que a velocidade passa a ser constante, a força resultante é zero. Logo, pode-se escrever:

$$F_a + E - P = 0 \qquad (5)$$

ou seja,

$$6\pi\mu R v_t^{teórica} + \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_f g - \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_e g = 0 \qquad (6)$$

em termos da velocidade terminal teórica ($v_t^{teórica}$) tem-se,

$$v_t^{teórica} = \frac{2R^2 g\left(\rho_e - \rho_f\right)}{9\mu} \qquad (7)$$

em termos da viscosidade dinâmica (μ) tem-se,

$$\mu = \frac{2R^2 g\left(\rho_e - \rho_f\right)}{9v_t^{teórica}} \qquad (8)$$

Entretanto a velocidade terminal teórica ($v_t^{teórica}$) dada pela Equação 7 não condiz com o valor da velocidade terminal real medida no laboratório (v_t^{real}), visto que as paredes do tubo exercem uma influência sobre o movimento da esfera no sentido de "retardá-la" (efeito de parede). Para levar em conta este efeito, utiliza-se um fator de correção (K) dada pela correlação de Ladenburg que é função do raio da esfera (R), do raio do tubo (R_T) e da altura total do fluido no tubo (H) (Equação 9).

$$K = \left(1 + 2{,}4\frac{R}{R_T}\right)\left(1 + 3{,}3\frac{R}{H}\right) \text{ sendo } K \geq 1 \qquad (9)$$

Desta forma, a velocidade terminal real da esfera medida no laboratório (v_t^{real}), levando-se em conta o efeito da parede, é dada por:

$$v_t^{real} = \frac{v_t^{teórica}}{K} \text{ , ou seja, } \quad v_t^{teórica} = K v_t^{real} \qquad (10)$$

e, consequentemente, a viscosidade corrigida é dada por

$$\mu = \frac{2R^2 g\left(\rho_e - \rho_f\right)}{9\left(K v_t^{real}\right)} \qquad (11)$$

3 – Materiais

Os materiais necessários para a execução do procedimento são:

- Conjunto para queda em meio viscoso;
- Esferas;
- Paquímetro;
- Cronômetro microcontrolado;
- Sensores fotoelétricos;
- Balança;

- Proveta de 50 ml;
- Líquidos dos quais se deseja medir as viscosidades.

4 – Procedimento Experimental

1) Posicione os sensores distanciados de 100 mm um do outro, sendo o sensor mais baixo posicionado próximo do final do tubo. A Figura 1 ilustra o posicionamento dos sensores.

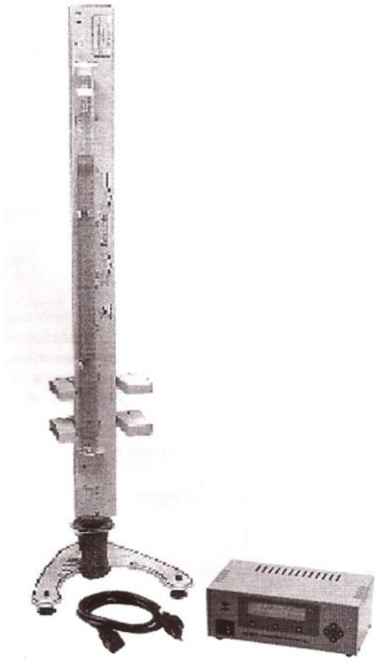

Figura 2 – Posicionamento dos sensores para a medida da velocidade terminal das esferas.

2) Meça o raio das esferas utilizando o paquímetro e anote os valores na Tabela 1 abaixo. Além disso, faça um cálculo do fator de correção de Ladenburg para cada esfera, colocando os resultados na tabela abaixo.

Tabela 1 – Raio das esferas e seus respectivos Fatores de Ladenburg.

Esferas	Raio das Esferas (m)	Fator de Ladenburg (K)
#1		
#2		
#3		
#4		

EXPERIMENTO 1) FLUIDO #1:

i) Caso a densidade do líquido seja desconhecida: meça na balança a massa da proveta seca; coloque 50 ml do líquido na proveta e determine a massa *m* do conjunto; desconte a massa da proveta; com os dados obtidos, calcule a densidade do líquido.

$\rho_f =$ kg/m^3

ii) Determine o tempo de queda de cada uma das esferas e em seguida calcule suas velocidade limites (observação v=L/Δt).

Obs: Não jogue as esferas, mas coloque-as na superfície do líquido usando uma pinça para minimizar sua velocidade inicial.

Esfera #1, Fator de Ladenburg, K =

Medida	**Tempo de queda (s)**	**Velocidade terminal real medida** v_t^{real} **(m/s)**	**Velocidade terminal corrigida** Kv_t^{real} **(m/s)**
1			
2			
3			
4			
Média			
Desvio padrão			

Esfera #2, Fator de Ladenburg, K =

Medida	**Tempo de queda (s)**	**Velocidade terminal real medida** v_t^{real} **(m/s)**	**Velocidade terminal corrigida** Kv_t^{real} **(m/s)**
1			
2			
3			
4			
Média			
Desvio padrão			

Esfera #3, Fator de Ladenburg, K =

Medida	**Tempo de queda (s)**	**Velocidade terminal real medida** v_t^{real} **(m/s)**	**Velocidade terminal corrigida** Kv_t^{real} **(m/s)**
1			
2			
3			
4			
Média			
Desvio padrão			

iii) Para cada uma das esferas utilizada, determinar a viscosidade da solução utilizando a Equação 11.

Esferas	**Raio das esferas (m)**	**Viscosidade da solução [kg/(m.s)]**
#1		
#2		
#3		
#4		

iv) Para cada uma das esferas calcule o número de Reynolds. Qual o tipo de escoamento desse fluido?

Esferas	Raio das esferas (m)	Número de Reynolds [-]
#1		
#2		
#3		
#4		

v) Calcule a força arraste nas esferas utilizando a Equação 3.

Esferas	Raio das esferas (m)	Força de arraste (kg.m/s^2)
#1		
#2		
#3		
#4		

vi) Construir um gráfico Kv_t^{real} x R^2. Obtenha do gráfico o coeficiente de viscosidade a partir de um ajuste linear aos pontos.

$$Kv_t^{real} = \frac{2g\left(\rho_e - \rho_f\right)}{9\mu} R^2$$

EXPERIMENTO 2) FLUIDO #2:

i) Caso a densidade do líquido seja desconhecida: meça na balança a massa da proveta seca; coloque 50 ml do líquido na proveta e determine a massa *m* do conjunto; desconte a massa da proveta; com os dados obtidos, calcule a densidade do líquido.

ρ_f =	kg/m^3

ii) Determine o tempo de queda de cada uma das esferas e em seguida calcule suas velocidade limites (observação v=L/Δt).

Esfera #1, Fator de Ladenburg, K =

Medida	Tempo de queda (s)	Velocidade terminal real medida v_t^{real} (m/s)	Velocidade terminal corrigida Kv_t^{real} (m/s)
1			
2			
3			
4			
Média			
Desvio padrão			

Esfera #2, Fator de Ladenburg, K =

Medida	Tempo de queda (s)	Velocidade terminal	Velocidade terminal

		real medida v_t^{real} (m/s)	corrigida Kv_t^{real} (m/s)
1			
2			
3			
4			
Média			
Desvio padrão			

Esfera #3, Fator de Ladenburg, K =

Medida	**Tempo de queda (s)**	**Velocidade terminal real medida v_t^{real} (m/s)**	**Velocidade terminal corrigida Kv_t^{real} (m/s)**
1			
2			
3			
4			
Média			
Desvio padrão			

iii) Para cada uma das esferas utilizada determinar a viscosidade da solução utilizando a Equação 11.

Esferas	**Raio das esferas (m)**	**Viscosidade da solução [kg/(m.s)]**
#1		
#2		
#3		
#4		

iv) Para cada uma das esferas calcule o número de Reynolds. Qual o tipo de escoamento desse fluido?

Esferas	**Raio das esferas (m)**	**Número de Reynolds [-]**
#1		
#2		
#3		
#4		

v) Calcule a força arraste nas esferas utilizando a Equação 3.

Esferas	**Raio das esferas (m)**	**Força de arraste (kg.m/s^2)**
#1		
#2		
#3		
#4		

vi) Construir um gráfico Kv_t^{real} x R^2. Obtenha do gráfico o coeficiente de viscosidade a partir de um ajuste linear aos pontos.

$$Kv_t^{real} = \frac{2g\left(\rho_e - \rho_f\right)}{9\mu} R^2$$

5 – Resultados

1. Calcule a viscosidade da glicerina utilizando cada uma das esferas de aço e de vidro;

2. Compare os valores da viscosidade da glicerina calculados aqui com aquele reportado na literatura. Calcule o erro relativo percentual para cada tipo de esfera;

3. Qual das esferas apresentou o menor erro relativo percentual? Qual das esferas apresentou o maior erro relativo percentual? Discuta o provável motivo que levou a estes resultados baseando-se nos fenômenos envolvendo a queda de um corpo em um meio fluido e nas hipóteses adotadas no desenvolvimento do equacionamento.

4. O que aconteceria com a velocidade terminal das esferas e, consequentemente, com a viscosidade do fluido, se a temperatura do fluido fosse aumentada?

6 – Simbologia

$v_t^{teórica}$ = velocidade terminal teórica da esfera sem a correção pelo fator de Ladenburg
Kv_t^{real} – velocidade terminal da esfera corrigida pelo fator de Ladenburg
g – aceleração gravitacional
ρ_e – densidade da esfera
ρ_f – densidade do fluido
R – raio da esfera
K – fator de correção de Ladenburg
F_a – força de arrasto
E – força de empuxo
P – força peso
R_T – raio do tubo
H – altura total do fluido no tubo (H)

7 – Referência Bibliográfica

http://www1.univap.br/spilling/FQE1/FQE1_EXP4_ViscosidadeLiquidos.pdf, último acesso em 16/03/2016, às 11:03.