

VISCOSIDAD

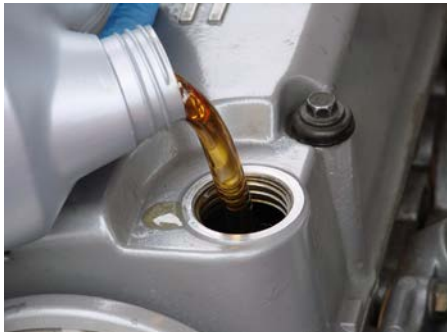
Ley de Newton

Ing. Rubén Marcano

VISCOSIDAD

- La viscosidad expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa.
- El coeficiente de viscosidad absoluta o simplemente la viscosidad absoluta de un fluido es una medida de su resistencia al deslizamiento o a la deformación cortante o angular.
- Al **umentarse la temperatura**, la viscosidad de todo **líquido disminuye**, mientras que la viscosidad de todo **gas aumenta**.

El aceite de los motores por ejemplo, tiene una viscosidad y una resistencia a cortadura altas, mientras que la gasolina tiene una viscosidad baja. Las fuerzas de fricción en un fluido en movimiento son el resultado de la cohesión y del intercambio de la cantidad de movimiento entre moléculas.



VISCOSIDAD

Examinemos el caso de dos (2) placas paralelas (figura 1), suficientemente grandes para que las condiciones de contorno se puedan despreciar, separadas una distancia pequeña Y , estando el espacio entre ellas llena de fluido. Se supone que la superficie inferior es estacionaria, mientras que la superficie superior se mueve en dirección paralela, a una velocidad U debido a la aplicación de una fuerza F que se corresponde con alguna área A de la placa móvil.

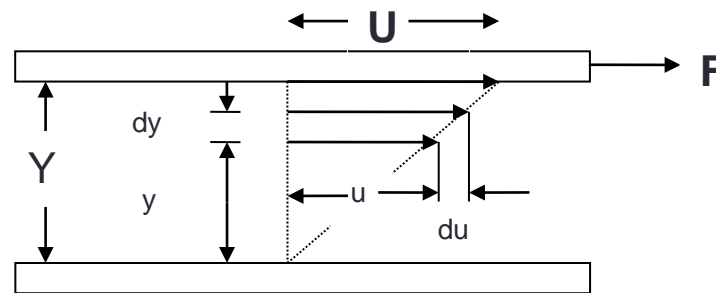


Figura N°1

En los contornos, las partículas de fluido se adhieren a las paredes, por lo que su velocidad es cero con respecto a la pared. Esta condición, llamada **condición de no deslizamiento**, ocurre con todo fluido viscoso. Como consecuencia en la figura N°1 la velocidad del fluido en contacto con la placa inferior tiene que ser cero mientras que la velocidad del fluido en contacto con la superficie superior tiene que ser U . La forma de la variación de la velocidad con la distancia entre las dos superficies se denomina **perfil de velocidades**.

VISCOSIDAD

Si la separación entre las placas Y , y la velocidad relativa entre ellas U no son demasiado grandes, y si el flujo neto de fluido a través del espacio entre las placas es nulo, se producirá un **perfil de velocidades lineal**, como el que se muestra en la figura N°1. El comportamiento es como si el fluido estuviera compuesto de una serie de capas finas, cada una de las cuales se desliza un poco en relación a la siguiente. Se ha demostrado en experimentos que una gran cantidad de fluidos en las condiciones anteriores cumple la siguiente relación:

$$F \propto \frac{A \cdot U}{Y}$$

Por semejanza de triángulos en la figura N°1, U/Y se puede reemplazar por el gradiente de velocidades du/dy . Si se introduce ahora una constante de proporcionalidad μ , el esfuerzo cortante τ entre dos (2) capas finas de fluido cualesquiera se puede expresar como:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{Y} = \mu \frac{du}{dy}$$

Ecuación de
Newton de la
viscosidad

VISCOSIDAD

La forma transpuesta de la ecuación anterior sirve para definir la constante de proporcionalidad:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}}$$

Que se denomina **coeficiente de viscosidad**, **viscosidad absoluta**, **viscosidad dinámica** (debido a que esta relacionada con la fuerza), o simplemente viscosidad del fluido.

Las dimensiones de la viscosidad absoluta son fuerza por unidad de área partido por el gradiente de velocidad.

En el sistema internacional de unidades (SI), las unidades de viscosidad absoluta son las siguientes:

$$\text{Dimensiones de } \mu = \frac{\text{Dimensiones de } \tau}{\text{Dimensiones de } \frac{du}{dy}} = \frac{\frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\text{s}^{-1}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{seg} = \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{seg}}$$

VISCOSIDAD

En el **sistema británico de unidades**, las unidades de viscosidad absoluta son las siguientes:

$$\text{Dimensiones de } \mu = \frac{\text{lbf} / \text{ft}^2}{\text{ft/s} / \text{ft}} = \frac{\text{lbf} \cdot \text{s}}{\text{ft}^2}$$

Una unidad muy utilizada para la viscosidad en el sistema (CGS) es el **poise (P)**, denominado así en honor a Jean Louis Poiseuille.

El poise es igual a $1 \text{ gr./cm} \cdot \text{seg}$ ó $0.10 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$.

El centipoise (cP) es igual a 0.01 Poise y es frecuentemente una unidad mas cómoda.

Tiene otra ventaja en cuanto que la viscosidad del agua a 68.4°F es 1cP. Por tanto, el valor de la viscosidad en centipoise es una indicación de la viscosidad del fluido con respecto a la del agua a 68.4°F .

Nota: Poise se pronuncia Pua

VISCOSIDAD

viscosidad cinemática (ν), así denominada por que la fuerza no esta involucrada en las dimensiones, quedando únicamente la longitud y el tiempo, como en cinemática. De esta forma:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{[\text{Centi Poise}]}{\left[\frac{\text{gramos}}{\text{cm}^3}\right]} = \frac{\frac{\text{cm} \times \text{seg}}{\text{gr}}}{\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{seg}} = [\text{Stoke}]$$

La viscosidad cinemática se mide habitualmente en m^2/seg en el sistema internacional, y en ft^2/seg en el sistema británico de unidades. Anteriormente, las unidades utilizadas en el sistema (CGS) eran cm^2/seg , también denominado Stoke (St). El centistoke (cSt) ($0.01\text{St} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{seg}$) era la unidad más conveniente en muchas ocasiones.

Propiedades de la viscosidad

- La viscosidad absoluta de todos los fluidos es prácticamente independiente de la presión en el rango de valores que se encuentran en el campo de la ingeniería.
- La viscosidad cinemática de los gases varía con la presión debido los cambios de densidad.
- La viscosidad de los vapores saturados o poco recalentados es modificada apreciablemente por cambios de presión, sin embargo los datos sobre vapores son incompletos y en algunos casos contradictorios, es por esto que cuando se trata de vapores distintos al de agua se hace caso omiso del efecto de la presión a causa de la falta de información adecuada.
- En un líquido las moléculas tienen una movilidad limitada con fuerzas cohesivas grandes. Un aumento de la temperatura disminuye la cohesión entre moléculas (se apartan más) y decrece la viscosidad o “pegajosidad” del fluido.
- En un gas hay gran movilidad y muy poca cohesión, sin embargo las moléculas chocan y de aquí que se origina la viscosidad; al aumentar la temperatura la temperatura aumenta el movimiento aleatorio y por ende la viscosidad.

El término **REOLOGÍA** fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la Física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación o flujo de la materia.

La Reología moderna, además de los comportamientos elástico y viscoso, estudia también sistemas complejos que presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas, es decir, sustancias viscoelásticas.

Son objeto de estudio de la Reología materiales tales como plásticos, fibras sintéticas, pastas, lubricantes, cremas, suspensiones, emulsiones, etc, los cuales constituyen la materia prima de las industrias farmacéutica, cosmética, agroalimentaria, cerámica, de pinturas, de barnices y otras.

Deformación y Flujo:

la deformación de un cuerpo puede ser clasificada en dos tipos generales: deformación espontánea reversible o elasticidad (Asociada a los sólidos) y deformación irreversible o flujo (Asociada a los líquidos).

Clasificación de la deformación



Elasticidad:

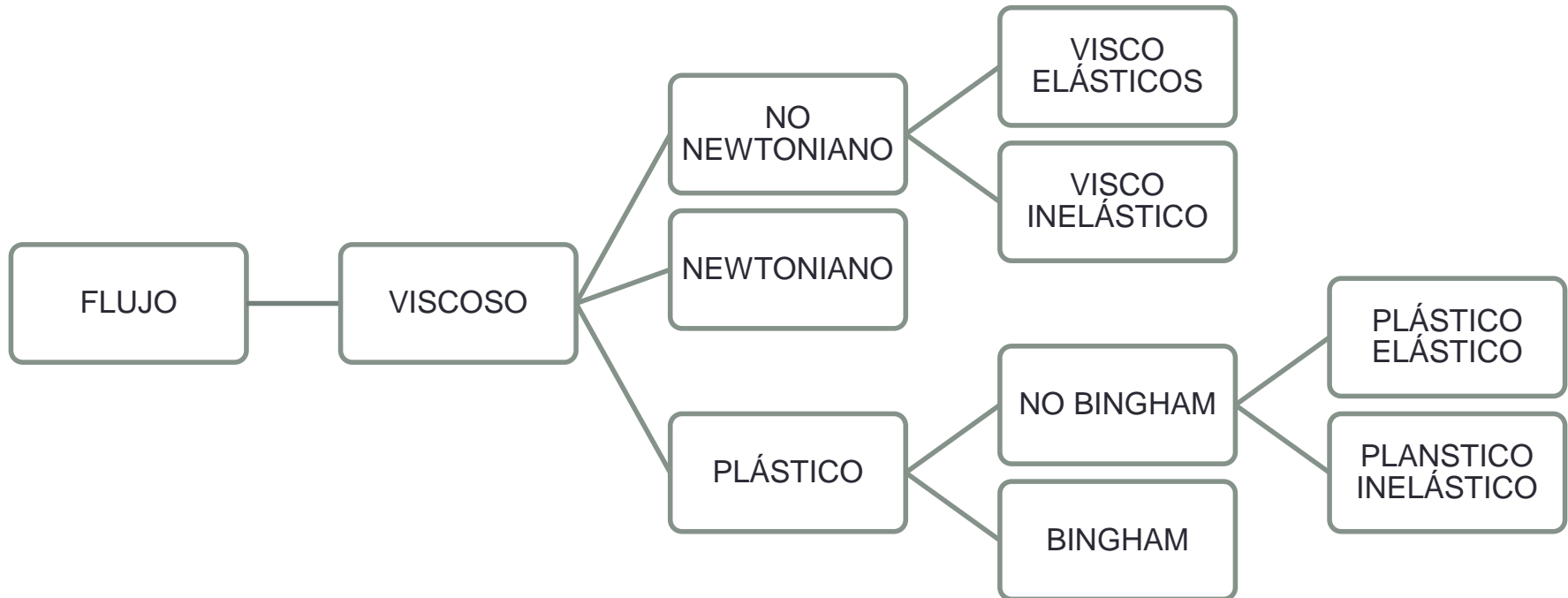
Un cuerpo es perfectamente elástico si una deformación se presenta instantáneamente con la aplicación de una fuerza y desaparece completa e instantáneamente con la eliminación de la misma.

Los cuerpos elásticos no ideales son aquellos que frente a la aplicación de un esfuerzo presentan una deformación no instantánea, que no desaparece instantáneamente con la eliminación del mismo. Se clasifican en sólidos elásticos completamente recuperables y sólidos elásticos incompletamente recuperables o visco elásticos.

Esfuerzo Cortante (τ):

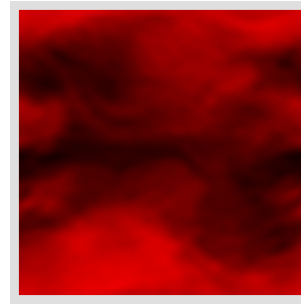
Esfuerzo es la intensidad, en un punto dado de la superficie de un cuerpo, de las componentes de la fuerza que actúan sobre un plano a través de un punto determinado, por lo que se tienen esfuerzos de tensión, de compresión y de corte, dependiendo si las componentes son tangencialmente hacia fuera o adentro del plano sobre el cual actúan las componentes de la fuerza. El esfuerzo se expresa en unidades de fuerza por unidad de área. La expresión matemática que define el esfuerzo de corte en términos de flujo está dada por la Ley de la viscosidad de Newton, donde se establece el flujo en una sola dirección, paralela al plano.

Clasificación Reológica para Líquidos:



Los **fluidos newtonianos** son aquellos cuya relación esfuerzo de corte vs gradiente de deformación es lineal y su viscosidad es una constante. La viscosidad de un fluido newtoniano está determinada únicamente por la temperatura y composición.

Ejemplo de este tipo de fluidos son: el agua, aceite, combustible, lubricantes, entre otros



La viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre

Los fluidos **no newtonianos** son aquellos cuya relación esfuerzo de corte y gradiente de deformación no es lineal. Los fluidos no newtonianos pueden ser viscoelásticos o viscoinelásticos.

Los **viscoelásticos** son aquellos que presentan una deformación viscoelástica y tienen un comportamiento reológico de características de sólido (componente elástico), como de líquido (componente viscoso). Los alimentos sólidos son en mayor o menor medida viscoelásticos.

Los **viscoinelásticos** son fluidos que al someterlos a un esfuerzo presentan una deformación irreversible o flujo, se les considera fluidos no newtonianos por excelencia.

Estos pueden ser clasificados como independientes o dependientes del tiempo.

Los **fluidos no newtonianos o viscoinelásticos independientes del tiempo** son aquellos en que a una temperatura constante, su viscosidad depende únicamente de la magnitud del esfuerzo de corte o del gradiente de deformación.

Son **fluidos adelgazantes al corte o pseudoplásticos** aquellos en los que la viscosidad disminuye, cuando el gradiente de deformación aumenta.

Los **fluidos espesantes al corte o dilatantes** son aquellos en los que la viscosidad aumenta cuando el gradiente de deformación aumenta. Como por ejemplo el almidón de maíz en agua.

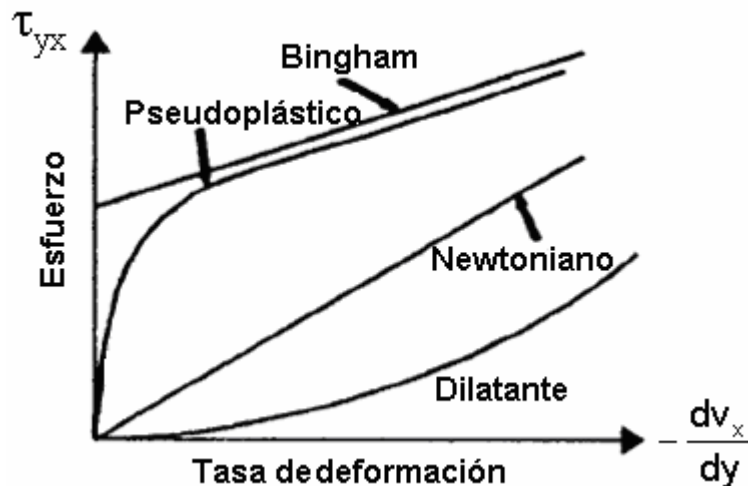
Los **fluidos no newtonianos o viscoinelásticos dependientes del tiempo** se clasifican en tixotrópicos o reopécticos.

Los fluidos tixotrópicos son aquellos en que a una temperatura y gradiente de deformación constante, presentan una disminución del esfuerzo de corte y de viscosidad.

Los reopécticos son aquellos fluidos que a una temperatura y gradiente de deformación constante presentan un aumento en el esfuerzo de corte y en la viscosidad.

Los **fluidos plásticos de Bingham** son aquellos en que la relación esfuerzo de corte y gradiente de deformación es lineal, pero para esfuerzos de corte pequeños se comportan como sólidos, presentando características elásticas y únicamente por el incremento del esfuerzo de corte hasta un cierto valor el sistema fluye, denominándose fluidos con esfuerzo de corte inicial.

Fluidos **plásticos no Bingham** son aquellas sustancias plásticas que presentan una relación no proporcional entre el esfuerzo de corte y el gradiente de deformación, y presentan un esfuerzo inicial. Se clasifican en plastoelásticos y plastoinelásticos, si tras ser sometidos al esfuerzo presentan reversibilidad parcial o total a la deformación.



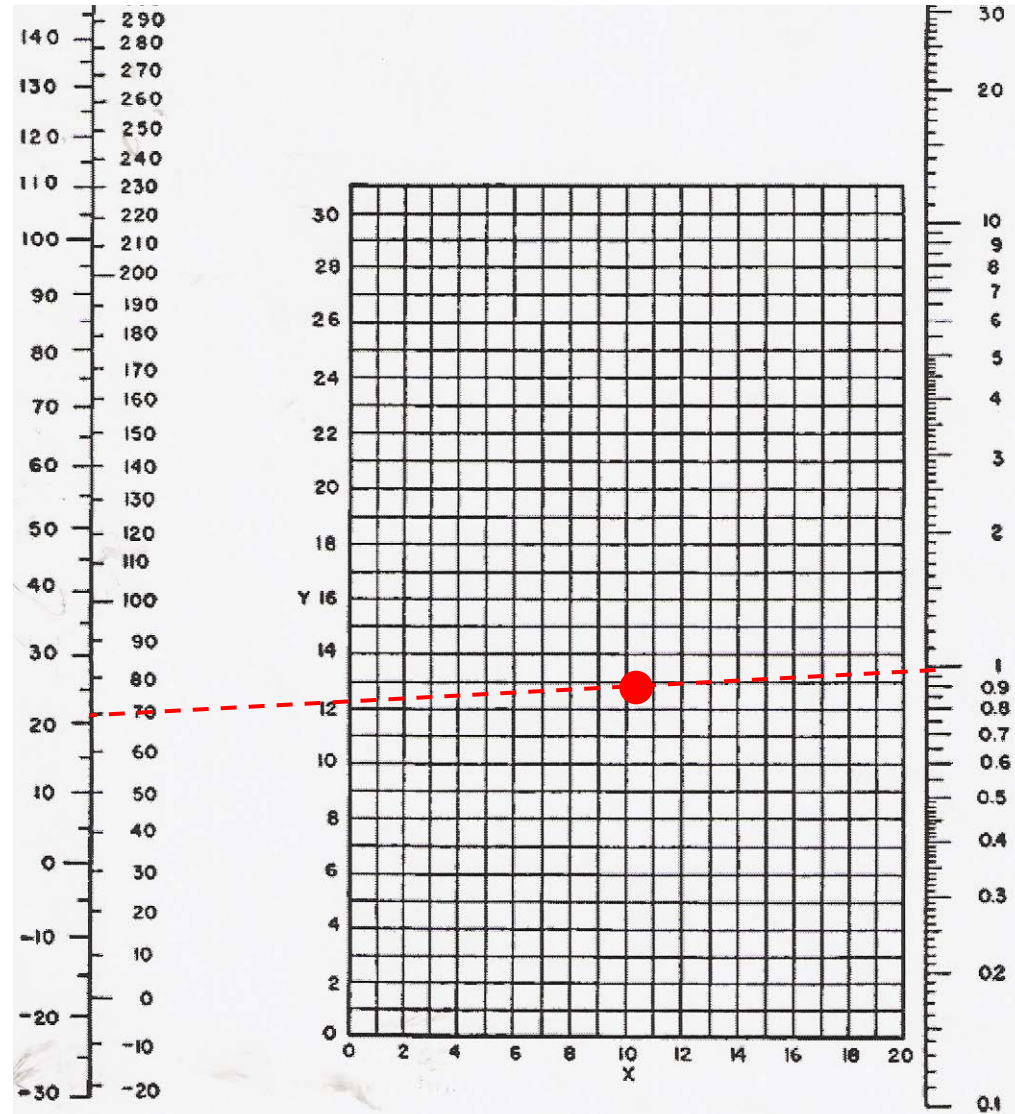
Actividad:

Investigar Ejemplos de cada una de las clasificaciones reológicas de los fluidos

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Líquido	X	Y
Acetaldehído	15.2	4.8
Acetato de Amilo	11.8	12.5
Acetato de Butilo	12.3	11.0
Acetato de Etilo	13.7	9.1
Acetato de Metilo	14.2	8.2
Acetato de Vinilo	14.0	8.8
Acetona 100%	14.5	7.2
Acetona 35%	7.9	15.0
Agua	10.2	13.0
Acido Acético 100%	12.1	14.2
Acido Acético 70%	9.5	17.0
Acido Butírico	12.1	15.3
Acido Clorosulfónico	11.2	18.1
Acido Fórmico	10.7	15.8
Acido Isobutírico	12.2	14.4
Acido Nítrico 95%	12.8	13.8
Acido Nítrico 60%	10.8	17.0

Nomograma para estimación de viscosidades de líquidos a 1 atm



CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Tabla 5.2. Viscosidades de aceites animales y vegetales (figura 2)

	Acido No.	Grav.Esp. 20/4°C	X	Y
Almendra	2,85	0,9188	6,9	28,2
Coco	0,01	0,9226	6,9	26,9
Hígado de bacalao	----	0,9138	7,7	27,7
Algodón	14,24	0,9187	7,0	28,0
Lardo	3,39	0,9138	7,0	28,2
Linaza	3,42	0,9297	6,8	27,5
Mostaza	----	0,9237	7,0	28,5
Aceite de manitas	18,35	0,9158	6,5	28,0
Oliva	----	0,9158	6,6	28,3
Aceite de Palma	9,0	0,9190	7,0	26,9
Perilla, Crudo	1,36	0,9297	8,1	27,8
Nabo	0,34	0,9114	7,0	28,8
Sardina	0,57	0,9384	7,7	27,8
Soya	3,50	0,9228	8,3	27,8
Esperma	0,80	0,8820	7,7	26,8
Girasol	2,79	0,9207	7,5	27,0
Ballena, refinado	0,78	0,9227	7,5	27,5

Tabla 5.3. Viscosidades de ácidos grasos comerciales 250 a 400°F (figura 2)

	Grav.Esp. a 300°F	X	Y
Láurico	0,792	10,1	23,1
Oleico	0,799	10,0	25,2
Palmítico	0,780	9,2	25,9
Estéarico	0,789	10,5	25,5

Tabla 5.1. Viscosidades de fracciones de petróleo

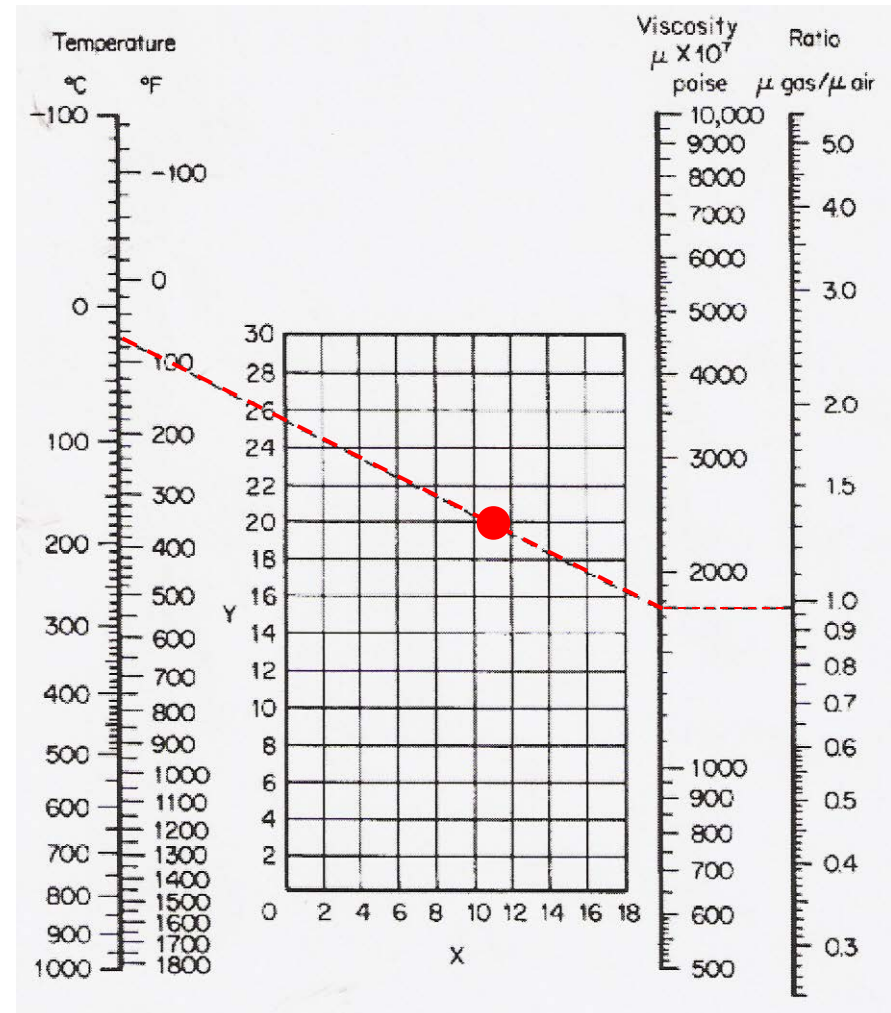
Para rangos de temperatura empleados en el texto las coordenadas deberán usarse en la figura 2:

	X	Y
75°API gasolina natural	14,4	6,4
56°API gasolina	14,0	10,5
42°API kerosén	11,6	16,0
35°API destilado	10,0	20,0
34°API crudo continental	10,3	21,3
28°API gas-oil	10,0	23,6

Nomograma para estimación de viscosidades de fracciones de petróleo, aceites minerales y vegetales y ácidos grasos comerciales

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Gas	X	Y
Acetato de Etilo	8.5	13.2
Acetona	8.9	13.0
Acetileno	9.8	14.9
Acido acético	7.7	14.3
Agua	8.0	16.0
Aire	11.0	20.0
Alcohol Etilico	9.2	14.2
Alcohol Metílico	8.5	15.6
Alcohol Propílico	8.4	13.4
Amoniaco	8.4	16.0
Argón	10.5	22.4
Benceno	8.5	13.2
Bromo	8.9	19.2
Buteno	9.2	13.7
Butileno	8.9	13.0
Bióxido de Azufre	9.6	17.0
Bióxido de Carbono	9.5	18.7
Bisulfuro de Carbono	8.0	16.0
Bromuro de Hidrógeno	8.8	20.9
Cianógeno	9.2	15.2
Ciclohexano	9.2	12.0
Cianuro de Hidrógeno	9.8	14.9
Cloro	9.0	18.4



Nomograma para estimación de viscosidades de gases a presiones Cercanas a la atmosférica

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

VISCOSIDAD DE GASES

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{M \times T}}{\sigma^2 \Omega_{\mu}}$$

Ecuación de Chapman - Enskog

Gases poco densos (bajas presiones)

μ = Viscosidad (P)

T = Temperatura (°K)

M = Masa molar

σ = Diámetro de colisión característico de cada molécula en Angstrom (10^{-10} m)
(Parámetro de Lenard Jones)

Ω_{μ} = Función integral de colisión

σ y Ω_{μ} se determina de acuerdo al siguiente criterio:

- Gases polares: potencial de Stockmayer (tablas 1 y 2)
- Gases no polares: potencial de Lennard – Jones (tablas 3 y 4)

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Tabla 3. Potenciales de Lennard-Jones determinados a partir de datos de viscosidad

Molécula	Compuesto	$b_0, \text{cm}^3/\text{gmol}$	$\sigma, \text{Å}$	$\varepsilon_0/k, ^\circ\text{K}$
A	Argón	46,08	3,542	93,3
He	Helio	20,95	2,551	10,22
Kr	Criptón	61,62	3,655	178,9
Ne	Neón	28,30	2,820	32,8
Xe	Xenón	83,66	4,047	231,0
Aire	Aire	64,50	3,711	78,6
AsH ₃	Arsina	89,88	4,145	259,8
BCl ₃	Cloruro de Boro	170,1	5,127	337,7
BF ₃	Fluoruro de Boro	93,35	4,198	186,3
B(OCH ₂) ₃	Borato Metílico	210,3	5,503	396,7
Br ₂	Bromo	100,1	4,296	507,9
CCl ₄	Tetracloruro de Carbono	265,5	5,947	322,7
CF ₄	Tetrafluoruro de Carbono	127,9	4,662	134,0
CHCl ₃	Cloroformo	197,5	5,389	340,2
CH ₂ Cl ₂	Cloruro de metileno	148,3	4,898	356,3
CH ₃ Br	Bromuro de metilo	88,14	4,118	449,2
CH ₃ Cl	Cloruro de Metilo	92,31	4,182	350
CH ₃ OH	Metanol	60,17	3,626	481,8
CH ₄	Metano	66,98	3,758	148,6
CO	Monóxido de Carbono	63,41	3,690	91,7
COS	Sulfuro de Carbonilo	88,91	4,130	336,0
CO ₂	Dióxido de Carbono	77,25	3,941	195,2
CS ₂	Disulfuro de Carbono	113,7	4,483	467

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Tabla 4. Valores de la integral de colisión Ω_v para la viscosidad y de la función de temperatura y viscosidad $f_1(kT/\epsilon_0)$ Basados en el potencial de Lennard-Jones.

$T^* =$ kT/ϵ_0	Ω_v	$f_1(kT/\epsilon_0)$	kT/ϵ_0	Ω_v	$f_1(kT/\epsilon_0)$	kT/ϵ_0	Ω_v	$f_1(kT/\epsilon_0)$
0,30	2,785	0,1969	1,65	1,264	1,0174	4,0	0,9700	2,0719
0,35	2,628	0,2252	1,70	1,248	1,0453	4,1	0,9649	2,1090
0,40	2,492	0,2540	1,75	1,234	1,0729	4,2	0,9600	2,1457
0,45	2,368	0,2834	1,80	1,221	1,0999	4,3	0,9553	2,1820
0,50	2,257	0,3134	1,85	1,209	1,1264	4,4	0,9507	2,2180
0,55	2,156	0,3440	1,90	1,197	1,1529	4,5	0,9464	2,2536
0,60	2,065	0,3751	1,95	1,186	1,1790	4,6	0,9422	2,2888
0,65	1,982	0,4066	2,00	1,175	1,2048	4,7	0,9382	2,3237
0,70	1,908	0,4384	2,10	1,156	1,2558	4,8	0,9343	2,3583
0,75	1,841	0,4704	2,20	1,138	1,3057	4,9	0,9305	2,3926
0,80	1,780	0,5025	2,30	1,122	1,3547	5,0	0,9269	2,4264
0,85	1,725	0,5346	2,40	1,107	1,4028	6,0	0,8963	2,751
0,90	1,675	0,5566	2,50	1,093	1,4501	7,0	0,8727	3,053
0,95	1,629	0,5985	2,60	1,081	1,4962	8,0	0,8538	3,337
1,00	1,587	0,6302	2,70	1,069	1,5417	9,0	0,8379	3,607
1,05	1,549	0,6616	2,80	1,058	1,5861	10	0,8242	3,866
1,10	1,514	0,6928	2,90	1,048	1,6298	20	0,7432	6,063
1,15	1,482	0,7237	3,00	1,039	1,6728	30	0,7005	7,880
1,20	1,452	0,7544	3,10	1,030	1,7154	40	0,6718	9,488
1,25	1,424	0,7849	3,20	1,022	1,7573	50	0,6504	10,958
1,30	1,399	0,8151	3,30	1,014	1,7983	60	0,6335	12,324
1,35	1,375	0,8449	3,40	1,007	1,8388	70	0,6194	13,615
1,40	1,353	0,8744	3,50	0,9999	1,8789	80	0,6076	14,839
1,45	1,333	0,9026	3,60	0,9932	1,9186	90	0,5973	16,010
1,50	1,314	0,9325	3,70	0,9870	1,9576	100	0,5882	17,137
1,55	1,296	0,9611	3,80	0,9811	1,9962	200	0,5320	26,80
1,60	1,279	0,9894	3,90	0,9755	2,0343	400	0,4811	41,90

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Ejemplo: Calcule la viscosidad del CO₂ a 200, 300 y 800 K y 1 atm.

$$\epsilon/K = 195.2 \text{ K}$$

$$\sigma = 3.941$$

$$\text{Masa Molar CO}_2 = 44.01$$

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{M \times T}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{44.01 \times T}}{(3.941)^2 \Omega_\mu}$$

$$\mu = 1.140 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{T}}{\Omega_\mu}$$

Viscosidades en Poise (gr/cm.sec)					
T (K)	KT/ε	Ωμ	T ^{1/2}	Viscosidad Predicha	Viscosidad Observada
200	1.025	1.5680	14.14	1.028x10 ⁻⁴	1.015x10 ⁻⁴
300	1.537	1.3020	17.32	1.516x10 ⁻⁴	1.495x10 ⁻⁴
800	4.100	0.9649	28.28	3.341x10 ⁻⁴

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

VISCOSIDAD DE GASES

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \times \mu_i}{\sum_{j=1}^n X_j \times \phi_{ij}}$$

Ecuación de Wilke (error 2%)

Mezcla de gases

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \cdot \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2$$

$$\phi_{ji} = \frac{\mu_j}{\mu_i} \cdot \frac{M_i}{M_j} \phi_{ij}$$

n = Numero de especies químicas existentes en la mezcla

X_i y x_j = Fracciones molares de las especies ij

μ_i y μ_j = Viscosidades de ij a la temperatura y presión del sistema

M_i y M_j = Pesos Moleculares de ij

Φ_{ij} = Numero adimensional

Si: $i=j$ entonces $\Phi_{ij} = 1$

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Ejemplo: Calcule la viscosidad de la siguiente mezcla de gases a 1 atm y 293 K a partir de los datos proporcionados sobre las componentes puras a la misma presión y temperatura.

Especie i	Fracción Molar X_i	Peso Molecular M_i	Viscosidad μ_i (Poise)
1. CO ₂	0.133	44.01	1462 x 10 ⁻⁷
2. O ₂	0.039	32.00	2031 x 10 ⁻⁷
3. N ₂	0.828	28.02	1754 x 10 ⁻⁷

$$\phi_{ji} = \frac{\mu_j}{\mu_i} \cdot \frac{M_i}{M_j} \phi_{ij}$$

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \times \mu_i}{\sum_{j=1}^n X_j \times \phi_{ij}}$$

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \cdot \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2$$

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

i	j	M_i/M_j	μ_i/μ_j	Φ_{ij}	$\sum_{j=1}^3 X_j \cdot \Phi_{ij}$
1	1	1.000	1.000	1.000	0.763
	2	1.375	0.720	0.730	
	3	1.571	0.834	0.727	
2	1	0.727	1.389	1.394	1.057
	2	1.000	1.000	1.000	
	3	1.142	1.158	1.006	
3	1	0.637	1.200	1.370	1.049
	2	0.876	0.864	0.993	
	3	1.000	1.000	1.000	

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{X_i \times \mu_i}{\sum_{j=1}^n X_j \times \phi_{ij}}$$

$$\mu_m = \frac{(0.133)(1462 \times 10^{-7})}{0.763} + \frac{(0.039)(2031 \times 10^{-7})}{1.057} + \frac{(0.828)(1754 \times 10^{-7})}{1.049}$$

$$\mu_m = 1714 \times 10^{-7} \text{ Poise}$$

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

VISCOSIDAD DE LIQUIDOS

$$\mu = \xi \cdot h \cdot \exp\left(3,8 \frac{T_b}{T}\right)$$

Ecuación de Eyring

Líquidos no Polares (error 25%)

μ = Viscosidad (Poise)

h = Constante de Planck = 6.624×10^{-27} erg.s

T_b = Temperatura normal de ebullición (K)

T = Temperatura (K)

$\xi = N/V = N \cdot \rho$

N = Numero de Avogadro = 6.023×10^{23} (gmol)⁻¹

V = Volumen Molar (cm³/gmol)

ρ = Densidad Molar (gmol/cm³)

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

Ejemplo: Estimar la viscosidad del benceno líquido a 20 °C (293.2K). El volumen molar es de 89 cm³/gmol y la temperatura normal de ebullición es de 80.1 °C

$$\mu = \xi \cdot h \cdot \exp\left(3,8 \frac{T_b}{T}\right) \qquad \mu = \frac{N}{V} \cdot h \cdot \exp\left(3,8 \frac{T_b}{T}\right)$$

$$\mu = \frac{(6.023 \times 10^{23})(6.624 \times 10^{-27})}{(89)} \exp\left(3,8 \frac{(273.2 + 80.1)}{(273.2 + 20)}\right)$$

$$\mu = 4.5 \times 10^{-3} \text{ Poise}$$

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

VISCOSIDAD DE LIQUIDOS

$$\mu = 0.0172 \cdot \frac{M^{0.5} \cdot P_C^{0.87}}{T_C^{0.167} \cdot P_V^{0.238}}$$

Ecuación de Czerny

μ = Viscosidad del liquido (Centipoise)

M = Peso Molecular

P_C = Presión Critica (atm)

T_C = Temperatura Critica (K)

P_V = Presión de Vapor a la temperatura del liquido (mmHg)