

92
20j



Universidad Nacional Autonoma de Mexico

Facultad de Ingenieria

ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN
FLUIDOS VISCOELASTICOS

TESIS

Que para obtener el título de :
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P r e s e n t a :
SILVIA BEATRIZ TAPIA FLORES



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

C O N T E N I D O

| | |
|---------------------------------------|-----|
| INTRODUCCION | 2 |
| CAPITULO I | 4 |
| Tipos de fluidos | |
| CAPITULO II | 17 |
| Ecuaciones básicas de los fluidos | |
| CAPITULO III | 32 |
| Ecuaciones reológicas | |
| CAPITULO IV | 40 |
| Transferencia de calor | |
| PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS EN ESTUDIO | 54 |
| APARATO EXPERIMENTAL | 84 |
| VALORES OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE | 95 |
| SECUENCIA DE CALCULO | 114 |
| RESULTADOS | 118 |
| CONCLUSIONES | 129 |
| BIBLIOGRAFIA | 132 |

INTRODUCCION

Durante las dos últimas décadas, el interés por los fluidos clasificados como no-newtonianos se ha incrementado, en especial por las soluciones poliméricas que se utilizan en la industria. Para su estudio es necesario conocer las propiedades, como su viscosidad y las dos diferencias de esfuerzos normales asociadas al flujo de los fluidos no newtonianos en movimiento cortante simple y determinar el coeficiente de transferencia de calor de los mismos.

En el primer capítulo del presente estudio se menciona en forma breve la clasificación de los fluidos; posteriormente en el capítulo número dos y tres se describen las ecuaciones constitutivas de los mismos.

El capítulo cuatro trata sobre los conceptos básicos de transferencia de calor en especial sobre el coeficiente convectivo de transferencia de calor en flujo interno a bajos números de Reynolds.

Se dedicó un capítulo completo al estudio de las propiedades de los fluidos que intervinieron en el experimento, tanto de los newtonianos como de los no newtonianos.

Posteriormente en forma rápida y sencilla se describe el aparato experimental utilizado, los valores obtenidos experimentalmente y la secuencia de cálculo, para que en un momento dado el lector pueda reproducir el experimento o a partir de los valores experimentales, reproducir o comprender en forma más clara los resultados.

Por último los resultados se encuentran contenidos en gráficas para su mejor y rápida visualización.

El presente estudio se realizó para flujo laminar dentro de una tubería rectangular para observar el cambio que sufre el coeficiente convectivo de transferencia de calor al agregarle a la sustancia en estudio fibras de carbón y grafito.

Se desea comparar el comportamiento del fluido newtoniano (glicerina), sin fibras y con fibras de carbón y grafito y por otro lado comparar el fluido no newtoniano (Separán AP-30 al 0.6%) sin fibras y con fibras de carbón y grafito.

CAPITULO I

TIPOS DE FLUIDOS

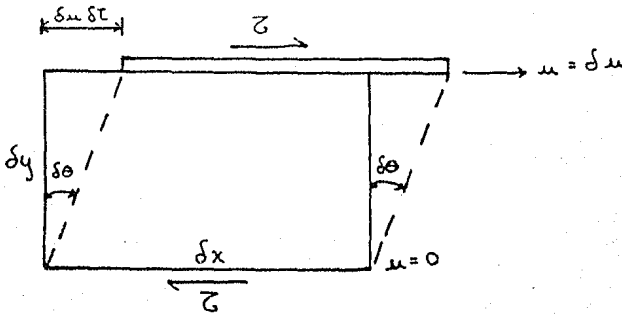
En la naturaleza existen dos tipos de fluidos. Los fluidos como todos los líquidos, gases y soluciones de bajo peso molecular, llamados fluidos newtonianos. Y, por otro lado tenemos las suspensiones coloidales y soluciones poliméricas, las cuales son materiales de alto peso molecular y son llamados fluidos no-newtonianos.

FLUIDOS NEWTONIANOS.

Desde el comienzo del estudio de los fluidos, el único tipo de fluido que se estudió fue el fluido newtoniano. No fue sino hasta hace relativamente poco tiempo que, debido al gran avance de la industria del polímero y del interés de la ciencia, por los fluidos que se comportaban "raramente", se empezaron a estudiar, y tratar de explicar los fluidos no newtonianos.

Un fluido newtoniano es aquel para el cual existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación.

Consideremos una partícula fluida sometida a un esfuerzo cortante τ , en un plano. El ángulo $\delta\theta$ de la deformación aumentará continuamente con el tiempo, mientras siga actuando τ , moviéndose la superficie superior con una velocidad δu mayor que la inferior.



Elemento deformándose a una velocidad $\frac{\delta\theta}{\delta t}$

Para fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación que resulta. $\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t}$

Donde la constante de proporcionalidad es el coeficiente de viscosidad μ , la cual para un fluido newtoniano es una constante característica del material que varía con la temperatura y la presión.

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{dv}{dy}$$

La viscosidad es una propiedad de una sustancia o medio, que se caracteriza por la acción en él, de las fuerzas de rozamiento interno, al moverse una parte del medio con relación a otra. Al moverse una parte del fluido respecto a otra, surgen fuerzas que frenan este movimiento, fuerzas de rozamiento o fuerzas de viscosidad. Debe hacerse notar que estas fuerzas tratan de igualar las velocidades del movimiento en todas las partes del medio.

Dentro de esta categoría de fluidos (newtonianos), tenemos el agua, la glicerina, el oxígeno, el aceite, etc.

FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Son aquellos para los cuales el esfuerzo cortante, a una presión y temperaturas dadas, no es una función lineal de la rapidez de deformación; es decir, la viscosidad de un fluido no newtoniano no es constante a una presión y temperaturas dadas, sino que depende de otros factores como la velocidad de deformación en el aparato en el que el fluido está contenido, o de la historia previa de las deformaciones del fluido.

Los fluidos no newtonianos se observan en suspensiones concentradas y en materiales de alto peso molecular. Una de las mejores oportunidades de observar fluidos no newtonianos es en la cocina. Por ejemplo, aderezos para ensalada, crema chantilly, la clara de huevo, etcétera.

Muchos de los fluidos biológicos importantes contienen componente de alto peso molecular y por lo tanto son no newtonianos; el más común es la sangre.

A los materiales no newtonianos frecuentemente se les denomina "viscoelásticos", indicando con esto que son materiales con una combinación de las propiedades de un fluido viscoso y las de un sólido elástico. Estos materiales tienen cierta memoria de su estado anterior y su viscosidad no es constante.

El fluido viscoso es aquel cuya rapidez de deformación es linealmente proporcional al esfuerzo aplicado.

Y un sólido elástico o de Hooke es un sólido que se deforma proporcionalmente a un esfuerzo, pero al dejar de aplicarlo regresa a su forma original.

Los fluidos no newtonianos se clasifican dentro de tres grandes grupos:

a) Fluidos stokesianos.- Son aquellos para los cuales la rapidez de deformación en un punto determinado es una función del esfuerzo cortante en ese punto y no depende de ninguna otra cosa.

b) Fluidos para los cuales la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación depende del tiempo en el que se le aplica el esfuerzo o de su historia previa.

c) Fluidos viscoelásticos.- Son fluidos que tienen una combinación de las propiedades de un fluido viscoso y las de un sólido elástico, presentando elasticidad parcial después de la deformación.

I FLUIDOS NO NEWTONIANOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO

En este tipo de fluidos la rapidez de deformación en cualquier punto del fluido es una función simple del esfuerzo cortante en ese punto.

$$\frac{d\theta}{dt} = \dot{\gamma} = f(\tau)$$

Esta ecuación describe a los fluidos no newtonianos viscosos, y se dividen en:

i) Fluido dilatante.

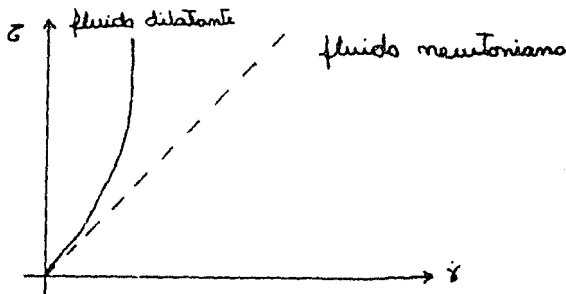
El fluido dilatante es aquel en el que la resistencia a la deformación aumenta al aumentar el esfuerzo cortante; es decir, la viscosidad aparente de estos materiales se incrementa con el aumento de la rapidez de deformación.

La ecuación de la ley de potencias es aplicable para describir este tipo de fluidos, en donde el exponente n es mayor que la unidad. Esta relación, que fue origi-

nalmente propuesta por Ostwald y ha sido ampliamente descrita por Reiner, puede ser escrita como:

$$\tau = k |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma}$$

Gráficamente, esta expresión, comparada con la de un fluido newtoniano (línea recta), nos queda de la siguiente manera:



fluido dilatante

El tipo de comportamiento que presenta el fluido dilatante fue encontrado por Osborne Reynolds en suspensiones con alta concentración de sólidos. La teoría de Osborne Reynolds acerca del comportamiento de estos fluidos es la siguiente: cuando la suspensión concentrada está en reposo, el líquido que contiene la suspensión, es suficiente para llenar los espacios vacíos, de la suspensión. Cuando el material comienza a moverse a bajas velocidades, el líquido que contiene es suficiente para lubricar el movimiento de las partículas, por lo cual el esfuerzo resultante es pequeño. Pero cuando el material se mueve a altas velocidades de deformación, el empaquetado denso de las partículas se rompe, el material se expande o dilata y los espacios vacíos se incrementan, provocando una insuficiencia de líquido para lubricar el flujo de las partículas, por lo cual los esfuerzos aplicados tienen que ser más grandes. La formación de esta estructura ocasiona que la viscosidad aparente se incremente rápidamente al aumentar la rapidez de deformación.

En los procesos industriales los fluidos dilatantes son menos comunes que los fluidos pseudoplásticos, pero cuando se puede aplicar la ley de potencia, ambos tipos de fluidos se tratan de la misma forma; considerándose que en los fluidos dilatantes el índice n es mayor que la unidad y en los pseudoplásticos n no es mayor que la unidad.

ii) Fluidos pseudoplásticos.

El fluido pseudoplástico es aquel en el que la resistencia a la deformación disminuye al aumentar el esfuerzo cortante; es decir, la viscosidad aparente disminuye con la rapidez de deformación y la curva de flujo llega a ser lineal a altas velocidades de deformación.

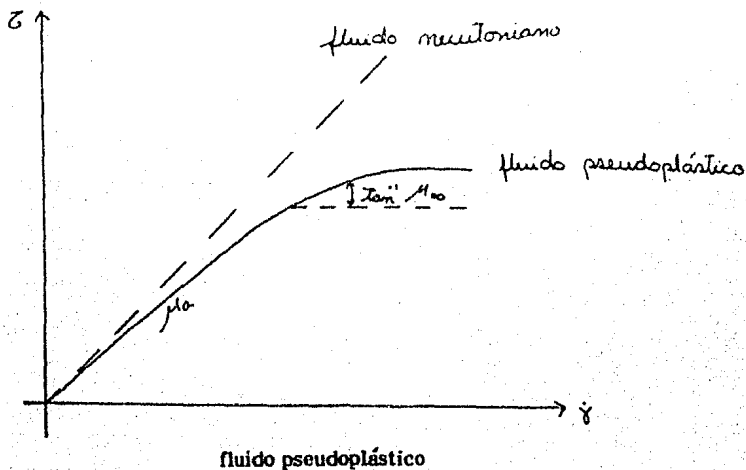
Pero se ha hablado de la viscosidad aparente y no se ha explicado qué es. La viscosidad aparente, μ_a , es la relación que existe del esfuerzo cortante a la rapidez de deformación.

La ecuación que describe el comportamiento de un fluido pseudoplástico es la ley de la potencia, ya expresada anteriormente:

$$\tau = K |\dot{\gamma}|^{m-1} \dot{\gamma}$$

En donde el exponente m es menor que la unidad. Como ya se dijo anteriormente, la rapidez de deformación cae progresivamente y la curva de flujo llega a ser lineal a altas velocidades de deformación. Esta pendiente límite es conocida como la viscosidad a esfuerzo infinito, μ_{∞} .

Gráficamente, el fluido pseudoplástico, comparándolo con un fluido newtoniano (línea recta) queda representado de la siguiente manera:



Una gráfica logarítmica de esfuerzo cortante contra rapidez de deformación de un fluido pseudoplástico es, por lo general, una relación lineal con una pendiente entre cero y la unidad.

iii) Fluidos plásticos.

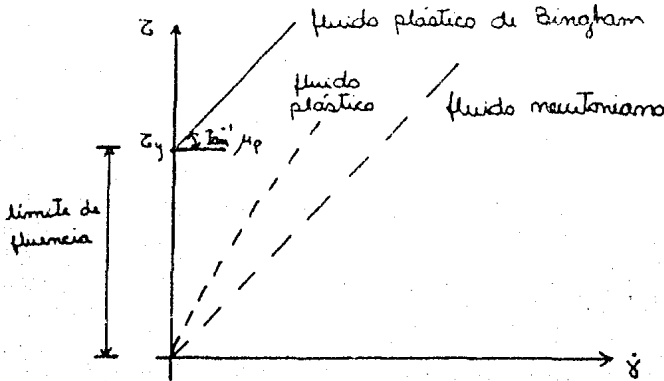
Un fluido plástico es aquel en donde es muy marcada la disminución de la resistencia a la deformación al aumentar el esfuerzo cortante. Dentro de éstos tenemos al fluido plástico de Bingham, en el cual se requiere exceder un esfuerzo finito, que es el límite de fluencia o esfuerzo crítico, para que empiece a fluir. La idealización de este fluido es que una vez que se excedió el límite de fluencia, se comporte como un fluido newtoniano. Pero el comportamiento en la fluencia puede ser también no lineal.

El fluido plástico de Bingham ideal está caracterizado por una curva de flujo que es una línea recta, la cual tiene una ordenada al origen de valor τ_y (esfuerzo crítico) y una ecuación reológica, que es la siguiente:

$$\tau - \tau_y = \mu_p \dot{\gamma} \quad \text{donde} \quad \tau > \tau_y$$

donde μ_p es la viscosidad plástica o coeficiente de rapidez, y es la pendiente de la recta.

Gráficamente, comparándolo con un fluido newtoniano, está caracterizada por:



La explicación del comportamiento de un fluido plástico de Bingham es que el

Fluido, cuando se encuentra en reposo tiene una estructura tridimensional lo suficientemente rígida como para resistir un esfuerzo menor al crítico, pero una vez que se excede este esfuerzo, la estructura se desintegra completamente y se comporta como un fluido newtoniano. Una vez que el esfuerzo cortante es menor al esfuerzo crítico, τ_c , la estructura se rehace.

Entre algunos de los fluidos que conocemos, que son fluidos plásticos de Bingham, se encuentran los lodos, las pinturas de aceite, la pasta de dientes, etc.

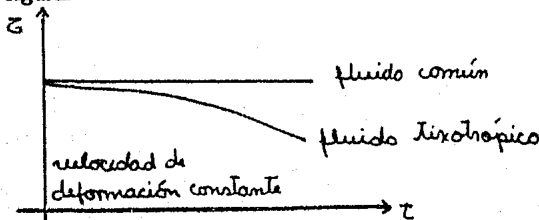
II FLUIDOS NO NEWTONIANOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

Gran cantidad de los fluidos no newtonianos no pueden ser descritos por una ecuación reológica sencilla, en la cual la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación sea independiente del tiempo. Es decir, existe una complicación adicional al comportamiento no newtoniano, y es que algunos fluidos precisan un aumento o disminución gradual en el esfuerzo cortante para mantener constante la velocidad de deformación. La viscosidad aparente de este tipo de fluidos, depende no solo de la rapidez de deformación, sino también de tiempo en que el esfuerzo ha sido aplicado.

Existen dos tipos de fluidos no newtonianos dependientes del tiempo y son los siguientes:

a) Fluido tixotrópico.

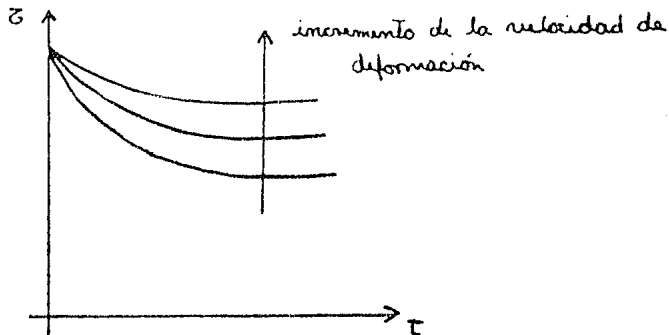
El fluido tixotrópico es aquel cuya consistencia depende de la duración del esfuerzo y de la rapidez de deformación; para mantener constante la rapidez de deformación es necesario disminuir gradualmente el esfuerzo cortante, como se muestra en la siguiente figura:



Efecto del tiempo sobre el esfuerzo cortante aplicado.

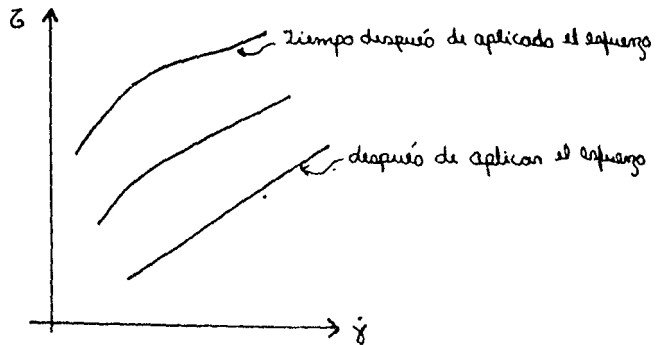
Si un material tixotrópico se pone en movimiento, después de un período de reposo, a una velocidad constante, la estructura adquirida, durante el período en reposo se romperá progresivamente y la viscosidad aparente disminuirá con el tiempo (como se muestra en la figura anterior). La velocidad de reformación de la estructura se incrementará con el tiempo al aumentar el número de ligaduras de la nueva estructura, hasta alcanzar un estado de equilibrio dinámico, el cual se logra cuando la velocidad de formación de la estructura es igual a la velocidad de rompimiento de la misma estructura. Esta posición de equilibrio depende de la velocidad de deformación y aumenta el rompimiento de la estructura al incrementarse la velocidad de de formación.

Por ejemplo, si tenemos un material que ha estado en reposo durante un tiempo largo y lo confinamos dentro de un viscosímetro cilíndrico, donde uno de los cilindros rota a velocidad constante, el torque del otro cilindro deberá incrementarse con el tiempo, como se muestra en la figura:

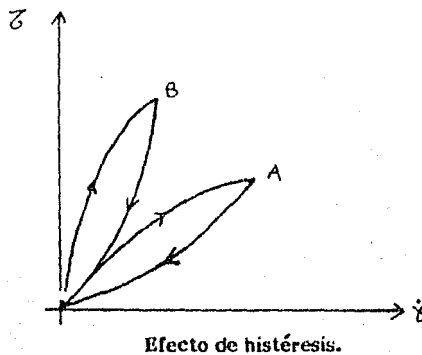


El decremento de la velocidad y el torque final dependen de la velocidad y de la velocidad de deformación.

En algunas ocasiones la tixotropía es un proceso reversible, por lo cual la estructura del material se regenera gradualmente después de estar en reposo, como se observa en la siguiente figura, en donde se grafica la curva de flujo de un material tixotrópico inmediatamente después de aplicar el esfuerzo y tiempo después de dejarlo en reposo; este proceso se repite varias veces y se obtienen las siguientes curvas:



Este tipo de comportamiento nos muestra una curva de histéresis al graficar el esfuerzo cortante contra la rapidez de deformación. Esta curva se obtiene graficando en primer lugar el incremento de rapidez de deformación a velocidad constante y posteriormente el decremento de la rapidez de deformación a velocidad constante. El efecto de tixotropía pueden presentarlo tanto fluidos newtonianos como pseudoplásticos, lo cual se muestra en la siguiente figura, siendo la curva A para fluidos del tipo newtoniano, y la curva B para los pseudoplásticos.

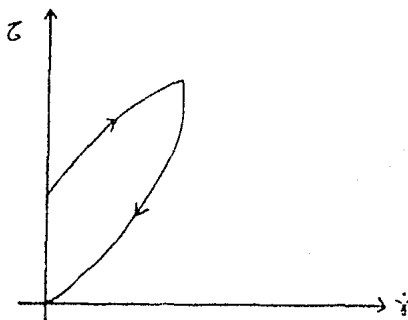


Para incrementar la altura de las curvas de flujo, es necesario aplicar el esfuerzo cortante a incrementos de tiempo cada vez más grandes, antes de realizar el trayecto de regreso. Una sola curva puede obtenerse continuando el proceso de aplicar el esfuerzo hasta llegar al equilibrio.

Dentro de los materiales tixotrópicos existen dos formas de comportamiento.

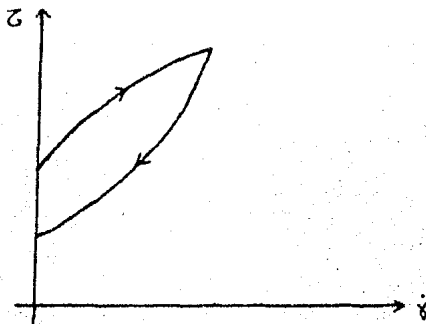
Los materiales tixotrópicos verdaderos y los materiales de cuerpo falso. El concepto de "cuerpo falso" fue introducido por Pryce-Jones para distinguir el tipo de comportamiento tixotrópico en varios plásticos de Bingham.

Los materiales tixotrópicos verdaderos son aquellos en los que la estructura se rompe completamente bajo la influencia de altos esfuerzos, llegando a ser verdaderos líquidos después de que el esfuerzo se ha dejado de aplicar, hasta que después de un período de tiempo se reforma la estructura. La curva de histéresis correspondiente es la siguiente:



Curva de histéresis de un material tixotrópico.

Los materiales de cuerpo falso son aquellos que no pierden completamente sus propiedades de sólido elástico y pueden exhibir un valor de rompimiento en el esfuerzo, que solo es apreciable después de estar en reposo por un período de tiempo grande. La curva de histéresis correspondiente a un material que se comporta como cuerpo falso es la siguiente:

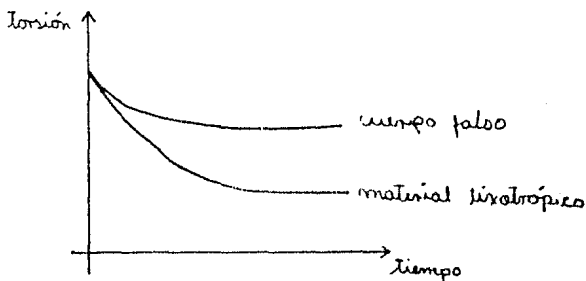


Curva de histéresis de un "cuerpo falso".

Considerando un recipiente con un cilindro, dentro del cual se coloca un alambre de torsión, analizando el efecto del cilindro cuando, después de que se pone en movimiento el cilindro, provocando el movimiento del fluido, se deja de mover el cilindro, con lo cual el fluido dejará de agitarse; se observa que existen dos clases de respuesta de la variación con el tiempo de la torsión del alambre.

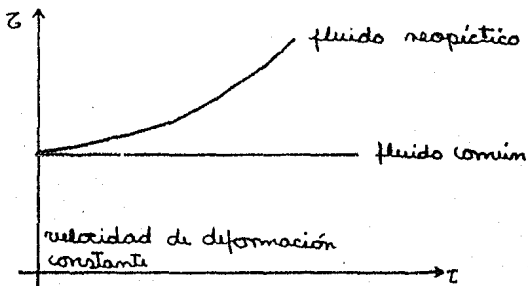
En los materiales de cuerpo falso existe una torsión residual en el alambre, - que nos indica que el material ofrece una resistencia permanente después de ser agitado, por lo cual retiene un valor finito de rompimiento.

En un material tixotrópico verdadero existe una torsión residual sólo si después de algún tiempo la agitación del alambre de torsión cesa, antes de que el cilindro sea soltado, para permitir la reformación de la estructura.



b) Fluido reopéctico.

El fluido reopéctico es un fluido no newtoniano dependiente del tiempo, que precisa un aumento gradual en el esfuerzo cortante para mantener constante la velocidad de deformación, como se ilustra en la siguiente figura:



Efecto del tiempo sobre el esfuerzo cortante aplicado.

En un fluido reopéctico, al aplicarle un esfuerzo cortante, la estructura se va formando gradualmente, de ahí la explicación del porqué, conforme pasa el tiempo, es necesario aplicar un mayor esfuerzo para poder mantener constante la velocidad de deformación. Pero en muchas ocasiones existe un valor crítico de esfuerzo cortante, en el cual la reformación de la estructura no ocurre, sino que se rompe. Este comportamiento se observa en soluciones diluídas de pentóxido de vanadio y bentonita.

Existen materiales en los cuales la estructura se forma bajo la acción del esfuerzo, pero ésta se desintegra gradualmente mientras el material se encuentra en reposo. A este fenómeno se le llama "reopexia".

La reopexia se realiza a velocidades de deformación pequeñas; si la velocidad es grande, la estructura no alcanzará a formarse. El flujo de un material reopéctico a través de un capilar, a diferencias de presión pequeñas, al principio el flujo es rápido, pero decrece porque la estructura empieza a formarse. Si se tienen diferencias de presión muy altas, el flujo siempre se incrementará, ya que a altas velocidades de deformación, la estructura no se forma.

CAPITULO II

ECUACIONES BASICAS DE LOS FLUIDOS

El análisis de los problemas sobre fluidos está basado en la solución de un cierto número de ecuaciones que representan ciertas leyes físicas, las cuales asumen el fenómeno por considerar.

Estas ecuaciones están agrupadas en dos categorías. En el primer grupo se encuentran las ecuaciones que representan leyes físicas características de todos los materiales. Son las "ecuaciones de balance" y son básicamente cuatro. Representan los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento, momento de la cantidad de movimiento y energía.

En el segundo grupo se encuentran ciertas leyes físicas que gobiernan el comportamiento de materiales específicos. La forma de estas ecuaciones depende de la "clase" de material por considerar, y los parámetros que aparecen en la ecuación dependen del material en particular. Hay básicamente cuatro ecuaciones en este grupo: una ecuación termodinámica de estado, en la cual se relacionan la densidad, la presión y la temperatura; una ecuación constitutiva, que relaciona el esfuerzo interno con variables cinemáticas; una ecuación de transferencia de calor, donde se relaciona el flujo de calor con la distribución de temperatura; y una ecuación del estado energético, en la que se relaciona la energía interna con variables independientes relevantes.

En principio, en un problema se requiere la solución de las ocho ecuaciones, pero en la práctica se pueden realizar varias simplificaciones. Una importante simplificación es considerar que la densidad de los fluidos permanece constante.

Considerando fluidos de densidad constante tenemos: ecuación termodinámica:

$$\text{densidad} = \text{constante}$$

El principio de conservación de masa, aplicado a cualquier sistema específico es:

$$\left(\begin{array}{l} \text{el flujo de masa neto} \\ \text{que entra al sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{incremento de masa en} \\ \text{el sistema.} \end{array} \right) \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Flujo neto de can-} \\ \text{tidades de movimien-} \\ \text{to o ímpetu relati-} \\ \text{vo al sistema} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Suma de todas las} \\ \text{fuerzas superficia} \\ \text{les que actúan en} \\ \text{el sistema} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Suma de todas las} \\ \text{fuerzas de cuerpo} \\ \text{actuando en el sis-} \\ \text{tema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Incremento de} \\ \text{cantidad de mo-} \\ \text{vimiento o ím-} \\ \text{petu del sistema} \end{array} \right)$$

Para fluidos newtonianos la ecuación constitutiva tiene la forma lineal simple de la ley de Newton, pero la ecuación constitutiva de los fluidos no-newtonianos tiene formas más complejas.

Para fluidos de densidad constante, la ecuación de estado es una relación entre la densidad, presión y temperatura. Cuando la temperatura es variable, se requiere además la solución de la ecuación de conservación de energía (la primera ley de la termodinámica), que introduce dos variables más; el flujo de calor y la energía interna. La ecuación de conservación de energía relaciona la energía interna con la temperatura, la densidad y el estado de deformación. Para un fluido newtoniano simple, la dependencia del estado de deformación puede despreciarse, por lo cual la ecuación energética se reduce a la dependencia del calor específico con la temperatura.

Para sistemas isotérmicos, la ecuación de balance de energía puede resolverse independientemente de la disipación de energía.

Para materiales más complejos, que poseen cierto grado de elasticidad, la energía interna puede almacenarse reversiblemente debido a la deformación, y la ecuación energética de estado necesariamente incluye variables cinemáticas independientes. En general, un fluido no-newtoniano es analizado básicamente, en términos de consideraciones de momentum o ímpetu y la pequeña información que puede ser obtenida del principio de conservación de energía en el presente.

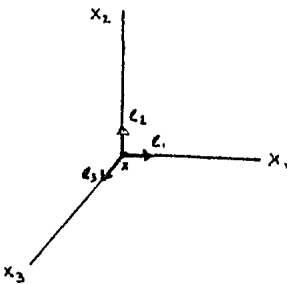
Antes de introducirme a las ecuaciones, expondré en forma breve algunos conceptos básicos.

Un vector es un segmento rectilíneo dirigido que describe cantidades físicas y geométricas, las cuales no quedan especificadas mediante un número, sino que para su completa identificación requieren de la especificación de una dirección y de

una magnitud. La representación de un vector es una flecha o en función de sus componentes; pero esta última representación tiene la desventaja de que depende de la base vectorial escogida y frecuentemente, por lo tanto, de un sistema de coordena-das.

Una base vectorial está formada por un conjunto de 3 vectores linealmente independientes. Si los vectores base son mutuamente ortogonales y de longitud unita-ria, la base se llama ortonormal.

En un sistema coordenado, se elige una base vectorial que asocia un vector base para cada punto en el espacio, llamada base natural; la cual se define de la siguiente manera:



$$e_1 = \frac{\partial x}{\partial x_1}$$

$$e_2 = \frac{\partial x}{\partial x_2}$$

$$e_3 = \frac{\partial x}{\partial x_3}$$

Las componentes de un vector con respecto a la base natural se denominan: - Contravariantes y las componentes de un vector con respecto a la base dual de la base natural son las covariantes. Siendo que los vectores de la base dual se indican como: e^1, e^2, e^3 . Dos bases son duales si se cumple:

$$e^i \cdot e_j \begin{cases} = 0 & \text{si } i \neq j \\ = 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

La distinción entre las componentes, covariantes y contravariantes, es principalmente en la relación de la existencia de un sistema de coordenadas. Cuando se escogen dos bases duales independientes del sistema de coordenadas, no existe la forma de elegir entre ellas y no puede darse nombres distintivos a las componentes con respecto a cada base.

Un tensor es un mecanismo que transforma un vector en otro vector, y definir un tensor significa dar las reglas bajo las cuales trabajará el mecanismo. Se indica de la siguiente manera:

$$b = A \cdot a \quad (3)$$

donde A es el mecanismo o tensor, a es el vector al que se le aplica el mecanismo y b es el vector que se obtiene.

Los componentes de un tensor con respecto a una base elegida, se definen como:

$$A_{ij} = e_i \cdot (A \cdot e_j) \quad (4)$$

Utilizando la base natural e_i y su dual e^i , se definen los diferentes tipos de componentes de un tensor.

| | |
|----------------|----------------------------------|
| covariante | $A_{ij} = e_i \cdot A \cdot e_j$ |
| contravariante | $A^{ij} = e^i \cdot A \cdot e^j$ |
| mixtos | $A^i_j = e^i \cdot A \cdot e_j$ |
| | $A_i^j = e_i \cdot A \cdot e^j$ |

Si se utiliza un sistema de coordenadas cartesianas, todos los tipos de componentes coinciden. Para el caso del tensor de esfuerzos, sus componentes cartesianos asumen el significado de componentes de una fuerza por unidad de área, actuando en las caras de un cubo con sus lados paralelos a los ejes coordenados.

El tensor de esfuerzos se define como el operador que asocia fuerzas a superficies.

El equivalente de la ecuación (3): $b = A \cdot a$, en sus componentes es:

$$b^i = A^{ij} a_j = A^i_j a^j \quad (3.a)$$

$$b_i = A_{ij} a^j = A_i^j a_j \quad (3.b)$$

Existen dos categorías de funciones escalares para tensores: aquellas para las cuales la relación es dependiente de la elección de alguna otra cantidad, y aquellas para las cuales la relación es única, llamadas invariantes o funciones isotrópicas.

Una de las relaciones invariantes más importantes es la traza de un tensor. El valor de la traza es independiente de la base que se use para calcular sus componentes. De aquí que se justifique que a la traza de A (el tensor), se le llame: Primera invariante de A y se indica por: I_A

$$I_A = \text{tr } A \quad (5)$$

La segunda invariante del tensor A , se indica por: II_A , y se define como:

$$II_A = \frac{1}{2} [I_A^2 - \text{tr}(A^2)] \quad (6)$$

La tercera invariante del tensor A , indicada por: III_A , es el determinante del tensor. Dados tres vectores cualquiera, linealmente independientes, obtener el volumen del paralelepípedo que se expande entre los tres vectores. Ahora considere otros tres vectores, obtenidos de operar el tensor A en los vectores dados, y calcular el volumen del paralelepípedo expandido por estos tres vectores. La relación del último volumen al volumen anterior es el determinante de A . El determinante obtenido no depende de la elección de los tres vectores, sino solamente del tensor A .

El valor de III_A también puede calcularse como el determinante de la matriz de los componentes del tensor A con respecto a una base ortonormal.

$$III_A = \det A$$

Las tres invariantes definidas se llaman: invariantes principales, y son importantes porque son la representación del teorema para tensores simétricos.

Las principales invariantes se relacionan en el teorema de Hamilton-Cayley.

$$A^3 - I_A A^2 + II_A A - III_A 1 = 0 \quad (7)$$

CAMBIO DE SISTEMA

Si se desea hacer un cambio de sistema, en base a su representación:

$$X^* - Y(\tau) = Q(\tau) \cdot (X - Z) \quad (8)$$

$$Z^* = Z + \alpha \quad (9)$$

tenemos que X^* es la "transformación" de X en el nuevo sistema. Siendo Z el tiempo del sistema "viejo" y Z^* es el tiempo en el sistema nuevo, y α es una cons-

tante; $Q(\tau)$ es un tensor ortogonal, x , $y(\tau)$ y z son puntos en el sistema "viejo".

La ecuación (8) es la ecuación de transformación de un punto que describe el movimiento relativo entre los dos sistemas; $Q(\tau)$ representa la rotación rigida y el vector $y(\tau) \cdot z$ representa el desplazamiento relativo de los dos sistemas en cualquier instante τ ; este vector describe la traslación.

Un vector a que se transforme como un vector geométrico, se denomina: vector indiferente

$$a^* = Q(\tau) \cdot a$$

Si tenemos un tensor A , tal que: $b = A \cdot a$, donde a y b son vectores indiferentes; nos queda que:

$$b^* = (Q(\tau) \cdot A \cdot Q^T(\tau)) \cdot a^*$$

donde $Q(\tau) \cdot A \cdot Q^T(\tau) = A^*$

siendo A^* la transformación de A . Un tensor que se transforme de acuerdo a la ecuación anterior es un tensor indiferente.

No todos los vectores, tensores o escalares son indiferentes; un caso típico de un vector que no es indiferente es la velocidad.

Para que un escalar sea indiferente debe permanecer constante después del cambio de sistema.

$$\alpha^* = \alpha$$

Como ejemplo tenemos la densidad, la temperatura, la energía interna, etc. Los escalares relacionados con vectores o tensores indiferentes son indiferentes. Un ejemplo de un escalar que no es indiferente es el tiempo, pero el intervalo de tiempo entre dos eventos sí es indiferente.

Por último, es importante mencionar que en un cambio de sistema, un tensor indiferente A da lugar a un tensor A^* , que tiene las mismas invariantes que A ,

mientras que un tensor no-indiferente \mathcal{B} da lugar a un tensor \mathcal{B}^* cuyas variantes son diferentes.

Ecuación de continuidad.

Sea v el vector velocidad, ρ la densidad, x un punto en el espacio y t el tiempo. En general:

$$v = v(x, t)$$

$$\rho = \rho(x, t)$$

El vector ρv representa el flujo de masa a través de una superficie octogonal al vector v

El principio de conservación de masa toma la forma:

$$\nabla \cdot (\rho v) = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (10)$$

llamada: "Ecuación Euleriana"

pero:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \cdot v \quad (11)$$

Expandiendo el lado izquierdo de la ecuación (10) obtenemos:

$$\nabla \cdot (\rho v) = \rho (\nabla \cdot v) + v \cdot \nabla \rho = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (12)$$

Introduciendo la ecuación (12) dentro de la ecuación (11) se obtiene la siguiente forma de la ecuación de balance de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \rho (\nabla \cdot v) - v \cdot \nabla \rho + \nabla \rho \cdot v = - \rho (\nabla \cdot v) \quad (13)$$

llamada: "Ecuación Lagrangiana".

Si se trata de un fluido de densidad constante, la ecuación de balance de masa se simplifica a:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (14)$$

En coordenadas cartesianas, tenemos:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

cuando: $\nabla \cdot v^* = \nabla \cdot v$

La ecuación es un sistema indiferente. El arreglo o sistema indiferente es - una propiedad de algunas leyes físicas. Pero no todas las leyes físicas son indiferentes, por ejemplo la ecuación dinámica es no-indiferente.

Ecuación dinámica.

La ecuación dinámica está basada en la suposición de que el sistema es inercial.

Para expresar el flujo neto de cantidad de movimiento que entra, consideraré la diada $\rho v v$, que es el flujo de cantidad de movimiento. Por la definición de - una diada tengo:

$$\rho v v \cdot ds = v (\rho v \cdot ds)$$

donde el término entre paréntesis del lado derecho de la ecuación, me representa el flujo másico a través de la superficie del elemento considerado; por lo tanto - $\rho v v \cdot ds$ es el flujo de cantidad de movimiento a través del mismo elemento de superficie.

La divergencia de $\rho v v$ es el flujo neto de cantidad de movimiento que sa le por unidad de volumen:

$$\nabla \cdot (\rho v v) = \left(\begin{array}{l} \text{flujo neto de cantidad} \\ \text{de movimiento que sa} \\ \text{le por unidad de volu-} \\ \text{men.} \end{array} \right) \quad (15)$$

La fuerza de esfuerzo $d\tau$ actuando a través de un elemento superficial ds , es por definición el tensor total de esfuerzos

$$d\tau = T \cdot ds$$

La divergencia del tensor de esfuerzos T es:

$$\nabla \cdot T = \left(\begin{array}{l} \text{resultante de las fuer-} \\ \text{zas de superficie por -} \\ \text{unidad de volumen} \end{array} \right) \quad (16)$$

Descomponiendo el esfuerzo total nos queda:

$$\mathbf{T} = -p \mathbf{1} + \mathbf{\tau}'$$

donde p es la presión y $\mathbf{\tau}'$ es el tensor "deviatorico", siendo:

$$\text{Tr } \mathbf{\tau}' = 0$$

Obteniendo la traza del tensor de esfuerzo tenemos:

$$\text{Tr } \mathbf{T} = -3p \quad (17)$$

siendo esto la definición operacional de presión.

Con todo esto obtenemos que la divergencia del esfuerzo total:

$$\nabla \cdot \mathbf{T} = \nabla \cdot \mathbf{\tau}' - \nabla p \quad (18)$$

Considerando las ecuaciones: (15), (16) y (18), obtenemos la forma Euleriana de la ecuación dinámica, ecuación (2):

$$-\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) - \nabla p + \nabla \cdot \mathbf{\tau}' + \rho \mathbf{g} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) \quad (19)$$

La forma Lagrangiana de la ecuación (2) es:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} [\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})]$$

sustituyendo la ecuación (10):

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \right] = \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} \quad (20)$$

Sustituyendo en la ecuación (19), obtenemos la forma Lagrangiana de la ecuación dinámica:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{\tau}' + \rho \mathbf{g} \quad (21)$$

El lado izquierdo de la ecuación (21) es la fuerza inercial sobre la aceleración de la partícula, la cual es igual a las fuerzas de superficie y de cuerpo actuando en la partícula, las cuales están representadas en el lado derecho de la ecuación. Por lo tanto, esta ecuación es una reorganización de la Ley de Newton.

Es costumbre, en el estudio de mecanismos clásicos de fluidos, considerar la "ecuación de energía mecánica", la cual se obtiene del producto escalar de la ecuación dinámica con el vector velocidad. Pero esta ecuación contiene menor información que la ecuación dinámica, ya que es una ecuación escalar, mientras que la ecuación dinámica es una ecuación vectorial. Sin embargo la ecuación de energía mecánica es muy útil en la hidrodinámica clásica, donde el tensor "deviatorico" τ' es cero; pero tiene un uso muy limitado en fluidos newtonianos, y casi inútil para fluidos no-newtonianos.

Existen formas especiales de la ecuación dinámica. Por ejemplo, en la hidrodinámica clásica se define a un fluido ideal como aquel para el cual el tensor total de esfuerzos siempre es isotrópico, es decir:

$$\tau' = 0$$

para estos casos la ecuación dinámica toma la forma conocida como ecuación de Euler:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \rho g \quad (22)$$

si se considera a la gravedad como la única fuerza de cuerpo que está actuando, tenemos que:

$$g = -g \nabla z$$

donde z es la posición vertical y g es el valor de la aceleración de la gravedad. En este caso la ecuación de Euler se reduce a:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla (p + \rho g z) \quad (23)$$

El producto escalar de la ecuación (23) con el vector velocidad es conocida como la ecuación diferencial de Bernoulli.

Para fluidos newtonianos incomprensibles, la ley de Newton, que define la viscosidad τ toma la forma:

$$\tau = 2\mu D = \tau' \quad (24)$$

donde D es el tensor alargamiento o de deformación y está definido por:

$$D = \frac{1}{2} (\nabla v + \nabla v^T)$$

siendo D un tensor simétrico.

En general, cualquier tensor puede dividirse en la suma de un tensor simétrico y un tensor antisimétrico. Para el gradiente de velocidades tenemos:

$$\nabla v = D + W$$

donde: $D = \frac{1}{2} (\nabla v + \nabla v^T)$ vector alargamiento o de deformación

$W = \frac{1}{2} (\nabla v - \nabla v^T)$ vector de rotaciones o tensor "spin"

Sustituyendo la ecuación (24) en la ecuación (21), obtenemos la ecuación de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 v \quad (26)$$

Ecuación que es el punto inicial de la mecánica clásica de los fluidos newtonianos.

Ecuaciones de energía.

La ecuación de "energía mecánica" se obtiene del producto escalar de la ecuación dinámica con el vector velocidad.

$$\nabla \left(\frac{1}{2} v^2 \right) = \frac{1}{2} \nabla (v \cdot v) = \nabla v^T \cdot v = (D+W)^T \cdot v$$

siendo D un tensor simétrico y W un tensor antisimétrico

$$\nabla \left(\frac{1}{2} v^2 \right) = D \cdot v - W \cdot v = \nabla v \cdot v - 2W \cdot v$$

calculando el producto escalar del lado izquierdo de la ecuación (20) con el vector velocidad

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho (\nabla v \cdot v) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} v \cdot \rho \frac{Dv}{Dt} &= v \cdot \rho \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \rho (\nabla v \cdot v) \\ &= \rho \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) + v \cdot \rho \nabla \left(\frac{1}{2} v^2 \right) + 2 v \cdot \rho W \cdot v \end{aligned}$$

pero: $2 v \cdot W \cdot v = v \cdot \nabla v \cdot v - v \cdot \nabla v^T \cdot v = 0$

quedándonos: $v \cdot \rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) \quad (27)$

La ecuación de energía en su forma Lagrangiana es:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) = -v \cdot \nabla p + v \cdot \nabla \cdot \tau' + v \cdot \rho g \quad (28)$$

Esta ecuación (28) no es un principio de conservación, es sólo una forma escalar de la ecuación dinámica.

El principio de conservación de energía (primera ley de la termodinámica), - puede escribirse como sigue. Siendo U la energía interna por unidad de masa y gz la energía potencial por unidad de masa ($g \nabla z = g$). Tenemos:

a) Acumulación de energía por elemento de volumen:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(U + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) \right] = \rho z \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(U + \frac{1}{2} v^2 \right) \right]$$

b) Flujo neto de energía que entra por el flujo de masa:

$$- \nabla \cdot \left[\rho \left(U + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) v \right] = - \nabla \cdot \left[\rho \left(U + \frac{1}{2} v^2 \right) v \right] - g z \nabla \cdot \rho v - \rho v \cdot g \nabla z$$

c) Flujo neto de energía que entra por el flujo de calor q :

$$- \nabla \cdot q$$

d) Flujo neto de energía que entra como trabajo de las fuerzas de superficie. Si $d\tau$ es la fuerza del esfuerzo actuando sobre la superficie ds , el trabajo hecho, es decir, el flujo de energía mecánica es $v \cdot d\tau$; por lo tanto el flujo de energía a través de la superficie ds es:

$$v \cdot d\tau = v \cdot (\tau \cdot ds) = ds \cdot \tau^T \cdot v = ds \cdot \tau \cdot v$$

siendo: $\nabla \cdot (\tau \cdot v) = - \nabla \cdot (\rho v) + \nabla \cdot (\tau' \cdot v)$

Por lo tanto no debe considerarse ninguna fuerza de cuerpo, porque solo contribuye en el flujo de energía por el término $-\rho v \cdot g \nabla z$ que ya apareció en el -segundo inciso.

La forma Lagrangiana de la ecuación de balance de energía es:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(U + \frac{1}{2} v^2 \right) = - \nabla \cdot q - \nabla \cdot (\rho v) + \nabla \cdot (\tau' \cdot v) - \rho v \cdot g \nabla z \quad (29)$$

Sustituyendo la ecuación (28) en la ecuación (29), obtenemos la "ecuación de energía térmica"

$$\rho \frac{D U}{Dt} = - \nabla \cdot q + \tau' : \nabla v \quad (30)$$

considerando

$$\nabla \cdot (\rho v) = v \cdot \nabla \rho$$

densidad constante

$$\nabla \cdot (\tau' : v) = v \cdot \nabla \cdot \tau' + \tau' : \nabla v$$

comprobación:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + v \cdot \nabla \cdot \tau' - v \cdot \nabla p + v \cdot \rho g = -\nabla \cdot q - v \cdot \nabla p + v \cdot \nabla \cdot \tau' + \tau' : \nabla v - \rho v \cdot \nabla \varphi$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + v \cdot \nabla p = -\nabla \cdot q + \tau' : \nabla v + \rho v \cdot \nabla \varphi$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla \cdot q + \tau' : \nabla v \quad \dots \quad \text{L.Q.Q.D.}$$

En la mecánica de fluidos clásica, para fluidos de densidad constante se considera que el incremento de energía interna sólo se da a través del incremento de la entropía. Este es un uso de la relación de Maxwell:

$$\frac{Dv}{Dt} = -\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) + T \frac{Ds}{Dt} \quad (31)$$

donde el primer término del lado derecho es cero para fluidos de densidad constante. Esta ecuación se basa en que v es determinada solamente por la densidad y entropía, es decir, no entran variables cinemáticas en la ecuación de estado energética.

Sustituyendo la ecuación (31) en la ecuación (30) tenemos:

$$\frac{1}{\rho} (-\nabla \cdot q + \tau' : \nabla v) = -\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) + T \frac{Ds}{Dt}$$

$$\frac{Ds}{Dt} + \frac{\nabla \cdot q}{\rho T} = \frac{\tau' : \nabla v}{\rho T}$$

El segundo término del lado izquierdo representa el incremento de entropía en los alrededores del elemento de volumen considerado, por unidad de volumen. Por lo tanto el lado izquierdo me representa el incremento total de entropía, y el término $\tau' : \nabla v$ representa la "disipación de energía", es decir, el flujo que se convierte irreversiblemente en energía interna.

Pero existen fluidos que poseen cierto grado de elasticidad, los cuales acumulan energía interna en forma elástica, y por lo tanto la ecuación (31), para fluidos de densidad constante, nos queda:

$$\frac{DU}{Dt} = T \frac{DS}{Dt} + \frac{\partial U_d}{\partial t} \quad (32)$$

Esta ecuación (32) puede tomarse como la definición de U_d , ya que U y S se definen independientemente. En este caso el término $\partial' : \nabla V$ es la suma de la disipación y la acumulación de la energía elástica.

$$\partial' : \nabla V = \left(\rho T \frac{DS}{Dt} + \nabla \cdot q \right) + \rho \frac{\partial U_d}{\partial t}$$

debe tomarse en cuenta que la ecuación de energía sólo puede usarse si se conoce la dependencia de U_d en las variables cinemáticas.

Para la teoría clásica los cuatro principios de conservación de masa, cantidad de movimiento, momento de cantidad de movimiento y energía son independientes unos de otros. Pero en algunos trabajos recientes como los de Beatty y los de Green y Rivlin, fundados en la mecánica del medio continuo reemplazan esta suposición con un postulado de sistema indiferente; es decir, uno de los términos que aparecen en la ecuación de energía se supone que tienen una forma que es independiente del sistema de referencia. Con este postulado, la ecuación dinámica y la ecuación de conservación de momentum pueden deducirse de la ecuación de energía.

CAPITULO III

ECUACIONES DE ESTADO REOLOGICAS

Uno de los objetivos principales de la Reometría es el de constituir las ecuaciones de estado reológicas. Existen dos distintas teorías. La primera asociada bajo el nombre de Oldroyd y Lodge, emplean un sistema coordinado convectivo descando conocer las ecuaciones de estado reológicas de validez general. La segunda teoría - asociada a los nombres de Rivlin, Ericksen, Green, Coleman, Noll y otros, los cuales emplean tensores cartesianos para realizar esencialmente el mismo fin. A pesar de que la notación y los puntos de vista son diferentes, en ningún caso son mutuamente contradictorios.

Para el presente trabajo me basaré en la notación e ideas de Oldroyd, sin dejar de percibir la importante contribución de Rivlin, Ericksen, Green, Coleman, Noll y otros.

PRINCIPIOS BASICOS

Las ecuaciones de estado para líquidos elásticos deben satisfacer ciertos principios:

- 1) Las ecuaciones de estado deben ser consistentes con el requerimiento de que la conducta del material sólo depende de su historia reológica previa y no del estado en que se encuentren los elementos vecinos. Para esclarecer este principio — trabajaré con un sistema de referencia Lagrangeano. Sin embargo, en cualquier problema de fluidos, las ecuaciones de estado deben resolverse conjuntamente — con las ecuaciones de movimiento y continuidad (descritas en el capítulo anterior), junto con ciertas condiciones de frontera. Para este propósito, un sistema de coordenadas "Euleriano" es el más apropiado. Por lo tanto, el problema básico es trasladar la situación física, que está mejor determinada en un sistema Lagrangeano a un sistema de referencias Euleriano, el cual presenta mayores ventajas desde el punto de vista matemático.
- 2) Las ecuaciones de estado deben ser consistentes con el requerimiento de que la conducta del material no depende de la translación o rotación del material en el espacio. Es decir, en forma simple, que el movimiento de un material de cuerpo rígido no experimenta ningún cambio en los esfuerzos internos como respuesta al movimiento sobre cualquier presión isotrópica generada por el movimiento.

Una deformación se presenta cuando existe algún cambio en los esfuerzos internos. La interpretación física de este principio es la "indiferencia al observador". Es decir, cualquier ley física de presentar una "estructura indiferente". La "indiferencia" de la cual habla este principio, fue tratada en el capítulo anterior. Este principio es llamado "principio de objetividad material".

Oldroyd ha satisfecho estos dos principios introduciendo un sistema coordinado convectivo $\bar{\xi}^i$ dentro del material y que se deforma continuamente con él. Este sistema coordinado tiene la propiedad que un elemento material que está en $\bar{\xi}^i$ en el tiempo τ , estará en la misma posición (referido al sistema coordinado), en cualquier otro tiempo.

La ecuación $\bar{\xi}^i = \bar{\xi}^i(\xi)$ nos relata dos tipos de coordenadas convectivas $\bar{\xi}^i$ y $\bar{\xi}^i$, las cuales no involucran el tiempo explícitamente. Esto significa que las componentes convectivas de un tensor asociado a un mismo punto del material, pueden ser manipuladas de la misma forma que las componentes fijas de un tensor de un punto fijo en el espacio. Por lo tanto para el primer principio, que involucra un elemento material dado, sobre un período de tiempo, puede ser trabajado con un sistema de coordenadas convectivo.

El sistema de coordenadas convectivo tiene la ventaja de no ser afectado por cualquier superposición de un movimiento de cuerpo rígido, ya que se encuentra embebido en el material. Esto significa que uno puede trabajar con un sistema de coordenadas convectivo y usar variables y operaciones que no introduzcan alguna dependencia sobre el movimiento absoluto en el espacio, y con esto las ecuaciones de estado resultantes automáticamente satisfacen el segundo principio.

Por lo tanto, toda cantidad que se refiera al movimiento absoluto en el espacio es irrelevante, uno se interesa en el movimiento relativo de las partes de un elemento cualquiera en $\bar{\xi}^i$ y la distancia relativa ds entre los elementos en $\bar{\xi}^i$ y $\bar{\xi}^i + d\bar{\xi}^i$, dada por:

$$[ds(\tau')]^2 = \gamma_{ij}(\bar{\xi}, \tau') d\bar{\xi}^i d\bar{\xi}^j \quad -\infty < \tau' \leq \tau$$

donde τ representa el tiempo presente y τ' el tiempo anterior. $d\bar{\xi}^i$ es independiente de τ' , por lo tanto $\gamma_{ij}(\bar{\xi}, \tau')$ es una medida directa de $ds(\tau)$ y es una opción a variable cinemática. Pero en algunos propósitos es más conveniente utilizar la variable de deformación $\gamma_{ij}(\bar{\xi}, \tau') - \gamma_{ij}(\bar{\xi}, \tau)$, ya que pequeños

valores de esta variable corresponden a pequeñas deformaciones.

Un operador que ocurre frecuentemente en las ecuaciones de estado, es aquel que corresponde a una derivada con respecto al tiempo manteniendo el sistema de coordenadas convectivo constante, denotado por: $\frac{D}{Dt}$. Este operador (y su correspondiente operador integral) son de importancia significativa en la formulación de las ecuaciones de estado para los materiales con memoria. Es la llamada derivada material, que en coordenadas cartesianas corresponde a:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_k \frac{\partial}{\partial x_k} \quad \text{siendo } v_k \text{ las componentes del vector velocidad}$$

En coordenadas convectivas el tensor de esfuerzos covariante es tomada como la variable dinámica, $\sigma_{j\alpha}(\xi, \tau)$

Para que las variables y operadores, introducidos anteriormente, sean útiles en la solución de problemas de flujo, las ecuaciones formuladas deberán estar, preferiblemente, referidas a coordenadas x^i fijas en el espacio, para poder aplicar ciertas reglas de transformación, dadas por Oldroyd.

El tensor de esfuerzos covariante, $\sigma_{j\alpha}(\xi, \tau)$, se relaciona con el tensor de esfuerzos en coordenadas cartesianas, τ_{ik} , por la ley de transformación del tensor covariante:

$$\sigma_{j\alpha} = \frac{\partial x^i}{\partial \xi^j} \frac{\partial x^k}{\partial \xi^\alpha} \tau_{ik} \quad (1)$$

Esta ecuación (1), con x^i conocido nos representa cualquier cambio de sistema coordinado (no necesariamente cartesiano) y relaciones tensoriales similares, derivando con respecto a otras variables. Por ejemplo, el tensor métrico, g_{ik} del sistema coordinado x^i en relación con el tensor $\gamma_{j\alpha}(\xi, \tau)$ se expresa de la siguiente manera:

$$\gamma_{j\alpha} = \frac{\partial x^i}{\partial \xi^j} \frac{\partial x^k}{\partial \xi^\alpha} g_{ik}$$

La deformación del tensor $\gamma_{j\alpha}(\xi, \tau) - \gamma_{j\alpha}(\xi, \tau)$ se relaciona con el tensor G_{ik} por:

$$\gamma_{j\alpha}(\xi, \tau') - \gamma_{j\alpha}(\xi, \tau) = \frac{\partial x^i}{\partial \xi^j} \frac{\partial x^k}{\partial \xi^\alpha} G_{ik}$$

donde $G_{ik} \equiv \frac{\partial x^{i'm}}{\partial x^i} \frac{\partial x^{k'n}}{\partial x^k} g_{m'n}(x') - g_{ik}(x)$

y $x^{i'}$ es la posición en el tiempo τ del elemento que en el instante τ se encuentra en el punto x^i

Las componentes fijas equivalentes del operador $\frac{D}{D\tau}$ se representan por $\frac{\partial}{\partial \tau}$, dadas por:

$$\frac{\partial E_{ik}}{\partial \tau} = \frac{\partial E_{ik}}{\partial \tau} + v^\tau \frac{\partial E_{ik}}{\partial x^\tau} + \frac{\partial v^m}{\partial x^i} E_{mk} + \frac{\partial v^m}{\partial x^k} E_{im}$$

donde E_{ik} es un tensor covariante simétrico.

Las componentes fijas de cantidades como $\frac{1}{2} \frac{D^m}{Dt^m} (\gamma_{j\alpha}(\xi, \tau'))$ evaluadas en $\tau' = \tau$ son los tensores de rapidez de deformación:

$$e_{ik}^{(m)} = \frac{1}{2} \frac{\partial^m}{\partial \tau^m} g_{ik}(x)$$

donde $e_{ik}^{(1)}$ es el (primer) tensor de rapidez de deformación de la dinámica de fluidos clásica. Debe hacerse notar que los tensores enésimos de Rivlin-Ericksen están dotados por:

$$A_{ik}^{(m)} \equiv 2 e_{ik}^{(m)}$$

es decir:

$$A_{ik}^{(m)} = \frac{\partial^m}{\partial \tau^m} g_{ik}(x)$$

FLUIDO SIMPLE DE COLEMAN Y NOLL

Las ecuaciones de estado reológicas para fluidos en general, conocidos como "fluidos simples" incomprensibles son, en coordenadas convectivas:

$$\gamma_{j\alpha}(\xi, t) = -p \gamma_{j\alpha}(\xi, \tau) + \delta'_{j\alpha}(\xi, t) \quad (1.a)$$

$$\delta'_{j\alpha}(\xi, t) = \int_{-\infty}^t [\gamma_{j\alpha}(\xi, t') - \gamma_{j\alpha}(\xi, t)] \quad (2.a)$$

y en coordenadas fijas son:

$$T_{ik} = p g_{ik} + T'_{ik} \quad (3.a)$$

$$T'_{ik}(x, t) = \int_{-\infty}^t [G_{ik}(x, t, t')] \quad (4.a)$$

donde F es un funcional, que para fluidos incompresibles p es una presión isotrópica arbitraria y por lo tanto:

$$F(p) = 0$$

El tiempo τ no puede aparecer explícitamente en la ecuación de estado del material y ésta se reduce a:

$$T'_{ik} = \int_0^{\infty} [G_{ik}(s)] \quad \text{donde} \quad s = \tau - t' \quad (5.a)$$

Para fluidos elásticos que tienen una memoria desvaneciente, la historia de deformación distante de un material, se espera que tenga una influencia más débil - que la historia de deformación en un pasado reciente, en la forma de deformarse del material. Colman y Noll definieron una "norma" que involucra una función $h^{(i)}$, la cual satisface lo siguiente:

a) $h^{(i)}(s)$ está definida para $0 \leq s < \infty$ y tiene valores reales positivos: $h^{(i)}(s) > 0$

b) $h^{(i)}(s)$ decae a cero de acuerdo a $\lim_{s \rightarrow 0} s^{\pi} h^{(i)}(s) = 0$

Una forma conveniente de la norma es:

$$\|G(s)\| = \int_0^{\infty} |G(s)|^2 h^{(i)}(s) ds \quad (6.a)$$

donde $|G(s)|$ es la magnitud del tensor $G(s)$. La norma está diseñada para - dar mayor importancia al pasado reciente (pequeños valores de s)

La primera y segunda aproximaciones para un líquido incompresible en coordenadas cartesianas están dadas por:

$$T'_{ik} = \int_0^{\infty} H_1(s) G_{ik}(s) ds \quad (7.a)$$

$$T'_{ik} = \int_0^{\infty} H_1(s) G_{ik}(s) ds + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} H_2(s_1, s_2) G_{ij}(s_1) G_{jk}(s_2) ds_1 ds_2 \quad (8.a)$$

donde por la simetría del tensor de esfuerzos se requiere que:

$$H_2(s_1, s_2) = H_2(s_2, s_1)$$

Las ecuaciones de estado reológicas, (3.a) y (7.a) son las llamadas ecuaciones de viscoelasticidad lineal finita; las ecuaciones (3.a) y (8.a) se llaman ecuaciones viscoelásticas de segundo orden.

Las condiciones bajo las cuales la norma (6.a) es pequeña, son las condicio

nes bajo las cuales (7. a) y (8. a) son aproximaciones útiles de (5. a)

- 1) La norma es pequeña, si la deformación ha sido pequeña en la historia del movimiento. Sin embargo, es suficiente que la deformación haya sido pequeña en el pasado reciente.
- 2) La norma puede ser pequeña para deformaciones largas suaves, si el líquido es ligeramente elástico.
- 3) La norma es pequeña para movimientos retardados. Debe hacerse notar que para tener estos flujos lentos, la velocidad y la aceleración deben ser pequeñas.

Para el caso cuando la deformación es pequeña, pero no así la aceleración (por ejemplo, un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud y alta frecuencia) se utilizan las ecuaciones: (7. a) , (8. a)

FLUIDOS DE GREEN-RIVLIN

Green, Rivlin y Spencer, comenzando de premisas similares a las de Coleman y Noll. Las aproximaciones de bajo orden son esencialmente las mismas que las ecuaciones (7. a) , (8. a) . Los llamados "fluidos de Green-Rivlin" son aproximaciones al fluido simple cuyo procedimiento de aproximación es análogo a una expansión en serie Taylor de una función analítica, o, aplicando directamente el teorema de Stone-Weierstrass.

En casi todas las circunstancias de interés reológico el fluido de Green-Rivlin es equivalente al fluido simple de Coleman y Noll.

FLUIDOS DE RIVLIN-ERICKSEN.

Rivlin y Ericksen formularon las ecuaciones de estado reológicas con base en que el tensor de esfuerzos es función de los gradientes de velocidad y $(n-1)$ gradientes de aceleración. Es decir que el tensor de esfuerzos deba expresarse en función de los primeros n tensores de Rivlin-Ericksen.

Los fluidos de Rivlin-Ericksen son aproximaciones de fluido simple que es válido bajo condiciones de memoria desvaneciente y flujo retardado.

Las primeras dos aproximaciones de un fluido de "Rivlin-Ericksen" son:

1er. orden:

$$T'_{ik} = 2\alpha_1 e_{ik}^{(1)} \quad (1.c)$$

2o. orden:

$$T'_{ik} = 2\alpha_1 e_{ik}^{(1)} + 2\alpha_2 e_{ik}^{(2)} + 4\alpha_3 e_{ij}^{(1)} e_{jk}^{(1)} \quad (2.c)$$

donde:

$e_{ik}^{(n)}$ son los tensores de rapidez de deformación

y

$$\alpha_1 = - \int_0^{\infty} M_1(s) s \, ds$$

$$\alpha_2 = \int_0^{\infty} M_1(s) \frac{s^2}{2} \, ds$$

$$\alpha_3 = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} M_2(s_1, s_2) s_1 s_2 \, ds_1 \, ds_2$$

MODELO VISCOELASTICO SIMPLE DE OLDROYD

Oldroyd propuso, para la solución de problemas de flujo, las siguientes ecuaciones de estado; (en sistema de coordenadas cartesiano):

$$\begin{aligned} T'_{ik} + \lambda_1 \frac{\partial}{\partial t} T'_{ik} + \eta_0 T'_{jj} e_{ik}^{(1)} - \eta_1 (T'_{ij} e_{jk}^{(1)} + T'_{kj} e_{ji}^{(1)}) = \\ = 2\mu_0 [e_{ik}^{(1)} + \lambda_2 e_{ik}^{(2)} - 2\eta_2 e_{ij}^{(1)} e_{jk}^{(1)}] \quad (1.d) \end{aligned}$$

donde μ_0 es la viscosidad en la rapidez de deformación cero, y $\lambda_1, \lambda_2, \eta_0, \eta_1, \eta_2$ son constantes con dimensiones de tiempo.

Ecuaciones como (1.d) se realizaron con el deseo de generalizar las ecuaciones de estado reológicas, asociadas con fluidos simples. Pero este tipo de ecuaciones solo pueden usarse, en un modelo real, bajo rangos restringidos de deformación, por lo cual, muchas veces, es necesario recurrir a modelos más complicados.

CAPITULO IV

El calor es una energía en tránsito como consecuencia de una diferencia de temperaturas, llevándose a cabo de la temperatura más alta a la temperatura más baja.

Existen tres diferentes procesos de transferencia de calor. Se explicarán en forma breve y sencilla:

La conducción es la transferencia de calor que se da en un medio estacionario, el cual puede ser sólido o fluido.

La convección es la transferencia de calor que se lleva a cabo entre una superficie y un fluido en movimiento, cuando se encuentran a diferentes temperaturas.

La tercera forma de transferencia de calor es la llamada radiación térmica o simplemente radiación. Todas las superficies a una temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas en cualquier medio, incluyendo el vacío. Cuando se encuentran en el vacío dos superficies a diferentes temperaturas, la transferencia de calor entre ellas es solamente por radiación.

Con base en estas breves definiciones se observa que en el estudio que se está llevando a cabo las formas de transferencia de calor que se presentarán son, transferencia de calor por convección y por radiación térmica. Como la mayor parte de la transferencia de calor se lleva a cabo por convección, para facilitar el estudio se depreciará la transferencia de calor por radiación.

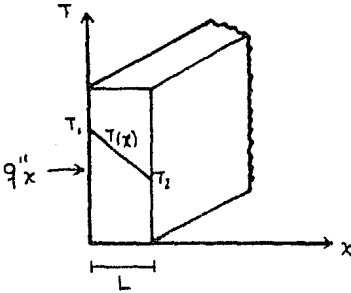
Los mecanismos físicos de cada proceso de transferencia de calor son los siguientes:

a) Conducción.

La conducción es un proceso que se lleva a cabo debido a la actividad atómica y molecular; la transferencia de calor se lleva a cabo como una transferencia de energía de las partículas con mayor energía a las de menor energía de la substancia, sólido o fluido, que se encuentra en reposo entre un gradiente de temperaturas. La transferencia de calor se lleva a cabo de la temperatura más alta a la más baja. La ecuación para la conducción es la ley de Fourier, que en un plano unidireccional, teniendo una distribución de temperaturas $T(x)$ se expresa como:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

donde q''_x , el flujo de calor, es la transferencia de calor en la dirección x por unid de área perpendicular a la dirección de transferencia y es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx en esa dirección. La constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica [$W/m \cdot K$] y es una propiedad característica de cada material. El signo menos es consecuencia de que la transferencia de calor se lleva a cabo en la dirección de disminución de temperatura.



Cuando la distribución de temperatura es lineal, el flujo de calor es igual a:

$$q''_x = -k \frac{(T_2 - T_1)}{L} = k \frac{(T_1 - T_2)}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$

b) Convección.

La transferencia de calor por convección se debe a dos mecanismos; se transfiere energía por el movimiento molecular aleatorio (difusión), pero además la energía se transfiere por el movimiento macroscópico del fluido, cuando se encuentra en presencia de un gradiente de temperaturas. Se estudia principalmente la transferencia de calor por convección que ocurre entre un fluido en mov. y una superficie en -- contacto con éste, cuando están a diferentes temperaturas. La convección es una -- combinación de conducción con transferencia de masa, y cabe recordar que sólo se -- presenta en materia en movimiento.

Existen diferentes clases de transferencia de calor dependiendo de la natura-leza del flujo. Tenemos la convección forzada cuando el flujo es originado por una causa externa, como una bomba, una hélice, etcétera. Por otro lado tenemos la convección libre o natural, donde el flujo es inducido por fuerzas internas del fluido, debido a las variaciones de densidad que acompañan los cambios de temperatura en un fluido.

Existen procesos de convección donde hay además un cambio "latente" de calor. Este cambio latente está asociado generalmente al cambio de estado líquido y - estado gaseoso de un fluido. Estos casos son la condensación, cuando se pasa de gas a líquido y la evaporación, cuando se pasa de líquido a gas.

La transferencia de calor por convección está representada por la ley de Newton del enfriamiento:

$$Q = h A (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

$$q'' = \frac{Q}{A} = h (T_s - T_\infty)$$

donde q'' es el flujo de calor convectivo por unidad de área en [W/m^2] y es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie del sólido T_s y el fluido T_∞ ; h es la constante de proporcionalidad en [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] conocido como coeficiente de transferencia de calor.

El coeficiente de transferencia de calor depende de las condiciones de frontera, las cuales dependen de la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y de algunas de las propiedades termodinámicas y de transporte del fluido.

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor.

| | h [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] |
|-------------------------------|--|
| convección libre | 5 - 25 |
| convección forzada: | |
| gases | 25 - 250 |
| líquidos | 50 - 20,000 |
| convección con cambio de fase | 2,500 - 100,000 |

c) Radiación.

La radiación es el intercambio de calor que se lleva a cabo en cualquier medio, incluyendo el vacío y está condicionado exclusivamente a la temperatura de los cuerpos. La emisión de energía por la materia que se encuentra a una temperatura finita se atribuye a los cambios en la configuración electrónica de las moléculas. - -

Existen dos teorías que implican cómo se efectúa la transferencia de calor:

teoría ondulatoria (electromagnetismo)

teoría corpuscular (mecánica cuántica)

Las dos teorías dan resultados similares y por facilidad explicaré la teoría ondulatoria. La energía es transportada por ondas electromagnéticas originadas a expensas de la energía interna de la materia que está emitiendo; es decir, el cuerpo que se encuentra a mayor temperatura empieza a producir ondas electromagnéticas a expensas de su energía interna, con lo cual la temperatura de éste empieza a disminuir, debido a que su energía interna disminuye. Mientras tanto, el cuerpo que se encuentra a menor temperatura absorbe las ondas electromagnéticas, con lo cual aumenta su energía interna y con ello su temperatura, a expensas de la energía de esta radiación.

El intercambio de energía radiante se lleva a cabo a cualquier temperatura y en cualquier medio, hasta que las temperaturas de los cuerpos se igualen (deja de efectuarse a la temperatura de cero absoluto).

El máximo flujo que es emitido por una superficie por radiación está dado por la ley de Stefan - Boltzmann.

$$Q'' = \frac{Q}{A} = \sigma T_s^4 \quad [W/m^2]$$

donde σ es la constante de Stefan - Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)
Este flujo de calor es emitido por una superficie ideal, llamado cuerpo negro; pero una superficie real emite menor cantidad de flujo de calor.

$$q'' = \epsilon \sigma T_s^4 \quad [W/m^2] \quad (4)$$

donde $0 \leq \epsilon \leq 1$

ϵ es la emisividad y es una propiedad característica de cada material.

La transferencia de calor por radiación entre dos superficies, considerando a una superficie pequeña completamente rodeada por una superficie mucho más grande, es decir una envolvente (la superficie y su envolvente están separadas por un gas que no influye en la transferencia de calor por radiación), está dada por:

$$q'' = \frac{Q}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{env}^4) \quad [W/m^2] \quad (5)$$

Con base en lo anterior, en el estudio realizado lo que nos interesa es la transferencia de calor por convección (se despreciará la pequeña cantidad de flujo de calor que se transmite por radiación sin querer con esto quitarle la importancia que tiene), por lo cual se ampliará un poco este tema.

La transferencia de calor por convección ocurre cuando un fluido a una velocidad U_{∞} y una temperatura T_{∞} pasa sobre una superficie de área A_s a una temperatura T_s , donde $T_s \neq T_{\infty}$

El flujo local de calor por unidad de área está dado por

$$q'' = h (T_s - T_{\infty}) \quad \text{[W/m}^2 \text{]} \quad (2)$$

donde h es el coeficiente local de transferencia de calor.

También existe transferencia de masa por convección, la cual se da cuando un fluido con una concentración molar $C_{A\infty}$, pasa por una superficie con una concentración $C_{As} \neq C_{A\infty}$. Como en nuestro caso no ocurre esta situación, no extenderé el tema.

El flujo local o total de calor es un parámetro importante en cualquier problema de convección; este flujo de calor depende del coeficiente de transferencia de calor h , el cual es desconocido y la determinación de este coeficiente es el problema de la convección (y de lo que se trata este estudio), este coeficiente depende de numerosas propiedades del fluido como densidad, viscosidad, conductividad térmica, calor específico, pero además depende de la geometría de la superficie y de las condiciones de flujo. Esto se debe a que la transferencia de calor por convección está determinada por la teoría de capa límite que se desarrolla en la superficie.

Existen tres tipos de capa límite:

- 1) Capa límite hidrodinámica, la cual nos representa la existencia de gradientes de velocidad y de un esfuerzo de corte.
- 2) Capa límite térmica que se presenta cuando el fluido en movimiento y la superficie se encuentran a diferentes temperaturas. Nos representa la existencia de gradientes de temperaturas y por lo tanto una transferencia de calor.

- 3) Capa límite de concentraciones, que determina la transferencia de masa por convección; nos representa la existencia de gradientes de concentraciones y de transferencia de especies.

Las principales manifestaciones de estas tres capas límites son: la fricción superficial (hidrodinámica), la transferencia de calor por convección (térmica) y la transferencia de masa por convección (de concentraciones).

Es muy importante determinar si se tiene flujo laminar o turbulento. La fricción superficial y la transferencia por convección dependen fuertemente de la condición existente. Para ello se calcula el número de Reynolds.

$$R_{e_x} = \frac{\rho U_{\infty} x}{\mu}$$

y con base en el número de Reynolds crítico se decide qué tipo de flujo se tiene.

si $R_{e_x} < R_{e_c}$ se tiene flujo laminar

$R_{e_x} > R_{e_c}$ se tiene flujo turbulento

En una capa límite laminar el fluido se mueve en forma ordenada y es posible identificar las líneas de corriente a través de las cuales se mueven las partículas y - en la capa límite turbulenta es imposible, ya que se mueven en forma irregular y ésta se caracteriza por fluctuaciones de la velocidad. Con base en esto podemos afirmar que se tiene una mayor transferencia de calor en un flujo turbulento, ya que ésta depende del movimiento molecular y macroscópico del fluido.

En el estudio nos interesan básicamente dos parámetros adimensionales; el número de Reynolds, para determinar la clase de flujo que se tiene, laminar o turbulento y nos representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

El otro parámetro es el número de Prandtl que nos da una medida de la eficiencia relativa del momentum o cantidad de movimiento y del transporte de energía por difusión en la capa límite hidrodinámica y térmica respectivamente. El número de Prandtl es una relación entre la difusividad de ímpetu o cantidad de movimiento y la difusividad térmica.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{k_f}{\rho c_p}$$

$$\therefore Pr = \frac{c_p \mu}{k_f} \quad (7)$$

Se está estudiando un fluido dentro de una tubería rectangular, por lo tanto se trata de un flujo interno.

En un flujo interno es necesario saber, además de si es laminar o turbulento, si se tiene o no un flujo plenamente desarrollado.

Primero es necesario determinar el tipo de flujo que tenemos con el número de Reynolds, que para un tubo circular se define como:

$$Re_D = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (8)$$

donde U_m es la velocidad media del fluido y D es el diámetro de la tubería.

Este número se compara con el número de Reynolds crítico, el cual tomaremos como:

$$Re_{D_c} = 2,300$$

Podemos obtener la velocidad media U_m a partir del gasto másico a través de la tubería:

$$\dot{m} = \rho U_m A_c \quad (9)$$

Para un flujo estable e incompresible dentro de un tubo de sección transversal constante \dot{m} y U_m son constantes independientes de x que es la coordenada en la dirección del flujo, y por lo tanto nos queda que

$$Re_D = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu} \quad (10)$$

Cuando tenemos un flujo plenamente desarrollado tenemos estas condiciones hidrodinámicas, considerando un sistema bidimensional (x, τ)

$$v = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Es decir la velocidad sólo tiene una componente, u , y ésta solo depende de τ :

$$u = u(\tau)$$

En ingeniería frecuentemente se necesita conocer la caída de presión que se requiere para mantener un flujo interno, para poder así determinar los requerimientos de una bomba, y para esto se utiliza un parámetro adimensional conocido como el factor de fricción, definido como:

$$f = \frac{-(dP/dx) D}{\rho U_m^2 / 2} \quad (11)$$

Este factor se encuentra en el diagrama de Moody. Cuando se trata de un flujo plenamente desarrollado laminar el factor de fricción es:

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (12)$$

Pero si se trata de un flujo turbulento plenamente desarrollado, es necesario entrar al diagrama de Moody con el número de Reynolds y la rugosidad de la superficie de la tubería. En varias ocasiones no se conoce la rugosidad de la tubería y se utilizan las siguientes correlaciones, cuando se tratan de superficies poco rugosas, es decir, lisas:

$$f = 0.316 Re_D^{-1/4} \quad (Re_D \leq 2 \times 10^4) \quad (13)$$

$$f = 0.184 Re_D^{-1/5} \quad (Re_D \geq 2 \times 10^4)$$

Para flujo interno la ley de enfriamiento de Newton se expresa como

$$q_s'' = h (T_s - T_m) \quad (14)$$

donde h es el coeficiente local de transferencia de calor, T_m es la temperatura media del flujo interno y T_s es la temperatura de la pared de la tubería. T_m varía en la dirección del flujo, es decir que dT_m/dx no es igual a cero si ocurre transferencia de calor. El valor de T_m se incrementa con x si la transferencia de calor es de la superficie al fluido ($T_s > T_m$); y se decreta con x en caso contrario ($T_s < T_m$)

En un flujo plenamente desarrollado no sólo dT_m/dx es diferente de cero, sino que $\partial T/\partial x$ a cualquier radio r también es diferente de cero; y por lo tanto $T(r)$ cambia constantemente con x . Para flujo plenamente desarrollado las condiciones térmicas implican que el perfil dimensional de temperatura es independiente de x , es decir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right] = 0$$

donde T_s es la temperatura superficial del tubo, T es la temperatura local del fluido y T_m es la temperatura media del fluido en la sección transversal del tubo.

Esta condición no es válida para tuberías que tienen un flujo de calor uniforme ($q_s'' = \bar{q}_s$) o una temperatura superficial uniforme ($T_s = \bar{T}_s$). Debe hacerse

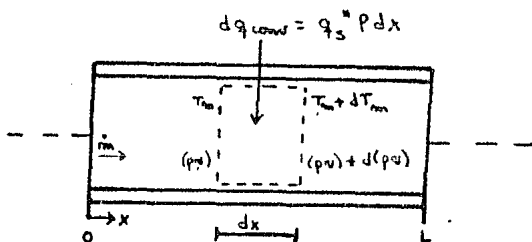
notar que estas dos condiciones no se pueden tener juntas, es decir, si q_s'' es constante, T_s debe variar con x ; mientras que si T_s es constante, q_s'' variará con x .

En el presente estudio se tiene el caso en que T_s , la temperatura superficial de la tubería, permanece constante ($dT_s/dx=0$), tenemos que para flujo plenamente desarrollado:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{(T_s - T)}{(T_s - T_m)} \frac{dT_m}{dx} \quad (T_s = \text{cte}) \quad (15)$$

en este caso el valor de $\partial T/\partial x$ sólo depende de la coordenada radial.

Considerando el siguiente volumen de control para flujo interno en una tubería



y aplicando la ecuación de balance de energía, tenemos:

$$dq_{conv} + \dot{m} (c_p T_m + p v) - [\dot{m} (c_p T_m + p v) + \dot{m} \frac{d(c_p T_m + p v) dx}{dx}] = 0$$

$$dq_{conv} = \dot{m} d(c_p T_m + p v)$$

Para un fluido incomprensible, es decir que $c_v = c_p$ y que v es muy pequeño, $d(pv)$ es mucho menor que $d(c_p T_m)$ nos queda que:

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p dT_m$$

pero $dq_{conv} = q_s'' \mathcal{P} dx$ donde \mathcal{P} es el perímetro de la tubería

$$q_s'' \mathcal{P} dx = \dot{m} c_p dT_m$$

$$\frac{q_s'' \mathcal{P}}{\dot{m} c_p} = \frac{dT_m}{dx} \quad (17)$$

pero por la ley de enfriamiento de Newton tenemos que:

$$q_s'' = h (T_s - T_m) \quad (14)$$

$$\therefore \frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' \mathcal{P}}{\dot{m} c_p} = \frac{\mathcal{P}}{\dot{m} c_p} h (T_s - T_m) \quad (18)$$

En esta ecuación en un tubo de sección transversal constante el perímetro es constante y entonces tenemos que $\frac{\mathcal{P}}{\dot{m} c_p}$ es constante. En una región de flujo plenamente desarrollado h es constante, aunque varía con x en la región de entrada. T_s es constante bajo ciertas condiciones, pero T_m siempre varía con x (excepto en el caso de que $T_s = T_m$)

La solución de esta ecuación para $T_m(x)$ depende de las condiciones térmicas superficiales, que pueden ser (en forma razonablemente aproximada), flujo de calor superficial constante o temperatura superficial constante.

En el presente estudio tendremos la condición de temperatura superficial -- constante, por lo cual ampliaré brevemente el tema.

Sabiendo que $\Delta T = T_s - T_m$ la ecuación (18) puede expresarse como:

$$\frac{dT_m}{dx} = - \frac{d(\Delta T)}{dx} = \frac{\mathcal{P}}{\dot{m} c_p} h \Delta T$$

separando variables e integrando desde el principio del tubo (i), hasta el final (f), tenemos:

$$\int_{\Delta T_i}^{\Delta T_f} \frac{d\Delta T}{\Delta T} = - \frac{\mathcal{P}}{\dot{m} c_p} \int_0^L h dx$$

$$\ln \frac{\Delta T_f}{\Delta T_i} = - \frac{\mathcal{P} L}{\dot{m} c_p} \left(\frac{1}{L} \int_0^L h dx \right)$$

$$\ln \frac{\Delta T_f}{\Delta T_i} = - \frac{\mathcal{P} L}{\dot{m} c_p} \bar{h}_L \quad (T_s = T_w) \quad (19)$$

donde \bar{h}_L es el valor de h para todo el tubo.

En forma más general, se puede integrar la ecuación desde la entrada de la tubería a una posición x dentro del tubo, quedando:

$$\ln \frac{\Delta T_x}{\Delta T_i} = \frac{\mathcal{P} x}{\dot{m} c_p} \bar{h}$$

$$\Delta T_x = T_s - T_m, x$$

$$\Delta T_i = T_s - T_{m,i}$$

$$\frac{T_s - T_m(x)}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{\rho x}{m c_p} \bar{h}\right) \quad (T_s = \bar{t}_e) \quad (20)$$

donde \bar{h} es el valor promedio de h desde el inicio a la posición x en el tubo.

La transferencia total de calor es igual a

$$Q_{conv} = \bar{h} A_s \Delta T_{lm} \quad (T_s = \bar{t}_e) \quad (21)$$

donde A_s es el área superficial del tubo ($A_s = \rho \cdot L$) y ΔT_{lm} es la diferencia de temperaturas logarítmica media

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_x - \Delta T_i}{\ln[\Delta T_x / \Delta T_i]} \quad (22)$$

donde

$$\Delta T_x = T_s - T_x$$

$$\Delta T_i = T_s - T_i$$

T_s = temperatura superficial de la tubería.

T_x = temperatura en el punto.

T_i = temperatura de entrada a la tubería.

Existen correlaciones convectivas empíricas que nos sirven para la determinación del coeficiente de transferencia de calor. Estas correlaciones dependen de varios factores como son la geometría de la tubería, si el flujo laminar o turbulento y si tenemos o no flujo plenamente desarrollado.

Se expondrán las correlaciones para flujo laminar, plenamente desarrollado de tubería de sección no circular, específicamente rectangular.

Para poder ocupar los conceptos ya expuestos, como el número de Reynolds y el número de Nusselt, es necesario utilizar en lugar del diámetro, el llamado diámetro hidráulico que se define como:

$$D_h = \frac{4A_c}{\rho} \quad (23)$$

donde A_c es el área de la sección transversal y ρ es el perímetro mojado.

Para saber qué tipo de flujo se tiene se calcula el número de Reynolds y se compara con el crítico

$$Re_{D_h} = \frac{\rho U_m D_h}{\mu} \quad (8)$$

$$Re_{D_c} = 2300$$

Cuando se tiene flujo turbulento se pueden utilizar las siguientes correlaciones para encontrar el número de Nusselt, para $Pr \geq 0.7$

Ecuación de Dittus - Boelter

$$Nu_{D_h} = 0.023 Re_{D_h}^{4/5} Pr^m \quad (24)$$

donde $m = 0.4$ si $(T_s > T_m)$ fluido calentándose
 $m = 0.3$ si $(T_s < T_m)$ fluido enfriándose

condiciones:
 $0.7 \leq Pr \leq 160$
 $Re_{D_h} \geq 10,000$
 $L/D_h \geq 60$

Esta ecuación debe usarse para pequeñas diferencias de temperaturas, $T_s - T_m$, con todas las propiedades evaluadas a T_m

Ecuación de Sieder y Tate

Se utiliza para grandes diferencias de temperatura

$$Nu_{D_h} = 0.027 Re_{D_h}^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (25)$$

condiciones:
 $0.7 \leq Pr \leq 16,700$
 $Re_{D_h} \geq 10,000$
 $L/D_h \geq 60$

todas las propiedades excepto μ_s se evalúan a T_m

Ecuación de Seban y Shimazaki

Se utiliza para flujo turbulento plenamente desarrollado con temperatura de


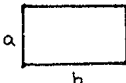
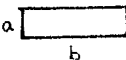
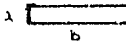
pared superficial constante

$$Nu_{D_h} = 5.0 + 0.025 Pe_{D_h}^{0.8} \quad (T_s = T_f) \quad (26)$$

$$Pe_{D_h} = Re_{D_h} Pr$$

condición: $Pe_{D_h} > 100$

Para cuando se tiene flujo laminar, el número de Nusselt, para flujo plenamente desarrollado se obtiene de la siguiente tabla

| sección transversal | b/a | $Nu_D (T_s = T_f)$ |
|---|-------|--------------------|
|  | 1.0 | 2.98 |
|  | 2.0 | 3.39 |
|  | 4.0 | 4.44 |
|  | 8.0 | 5.95 |

En resumen, para poder calcular el flujo de calor que se transmite de un medio con una mayor temperatura, a otro de menor temperatura, y el coeficiente de transferencia de calor, es necesario realizar cálculos que involucren un balance de energía y las correlaciones apropiadas de convección.

Primeramente hay que obtener el número de Reynolds si el flujo es laminar o turbulento y después establecer la longitud de la región en estudio. Posteriormente es necesario decidir si se trabajará en condiciones locales (en un punto particular) o en toda la tubería; para saber cual coeficiente se utilizará, el local o el medio, y por último se seleccionará la correlación convectiva y se usará con la forma apropiada de la ecuación de balance de energía para resolver el problema.

**VALORES OBTENIDOS
EXPERIMENTALMENTE**

Densidad de la glicerina con agua.

| $T [^{\circ}C]$ | $\rho [g/cm^3]$ | $T [^{\circ}C]$ | $\rho [g/cm^3]$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 8 | 1.2333 | 22 | 1.2235 |
| 10 | 1.2315 | 24 | 1.2222 |
| 11 | 1.230 | 25 | 1.2215 |
| 12 | 1.2295 | 26 | 1.2209 |
| 13 | 1.2288 | 28 | 1.2197 |
| 15 | 1.2275 | 30 | 1.2184 |
| 16 | 1.227 | 30.5 | 1.2180 |
| 17 | 1.2265 | 32 | 1.2172 |
| 18 | 1.2258 | 33 | 1.2167 |
| 19 | 1.225 | 34 | 1.216 |
| 20 | 1.2245 | 35 | 1.2153 |
| 21 | 1.224 | | |

La densidad de la glicerina con agua se obtuvo por medio de un picnómetro de un volumen de 49.973 cm^3 y una masa de 42.7695 g . La glicerina primeramente se enfrió y se fue calentando lentamente, tomando el peso de la glicerina contenida en el picnómetro a las diferentes temperaturas tabuladas.

Con base en los datos tabulados se consultó el Bosart and Snoddy, "Ind. Eng. Chem.", 20, 1378 (1928) y comparando valores se observa que se tiene una glicerina a una concentración del 86%, es decir, 86% glicerina y 14% agua.

Con estos valores se obtiene la siguiente recta:

$$\rho = -0.00063T + 1.2373 \quad [g/cm^3]$$

donde $[T] = [^{\circ}C]$

con una

$$R^2 = 0.9966$$

Viscosidad de la glicerina con agua.

El modelo de la viscosidad de un fluido newtoniano es:

$$\mu = a e^{b/T}$$

$$\ln \mu = \ln a + \frac{b}{T}$$

donde: $[\mu] = [\text{poiseo}]$
 $[T] = [^{\circ}\text{K}]$

Es necesario que la temperatura esté en grados absolutos (Kelvin o Rankine) para que el inverso de la temperatura tenga sentido físico.

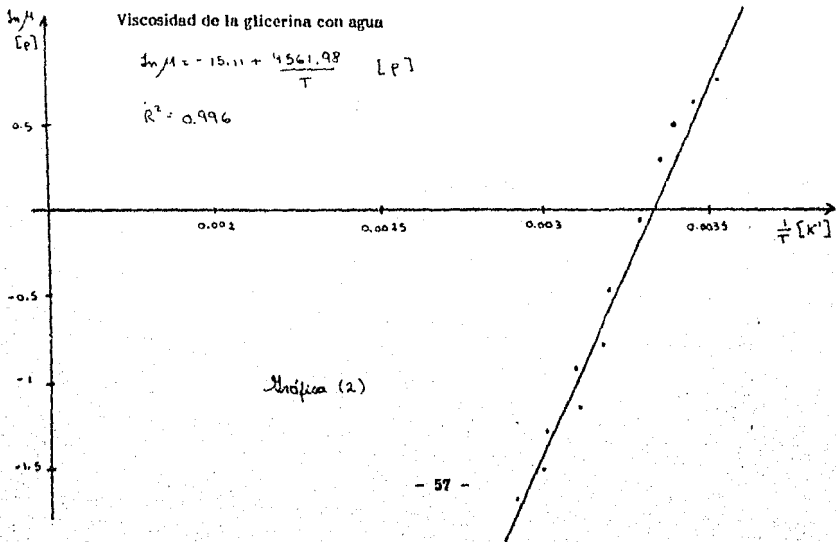
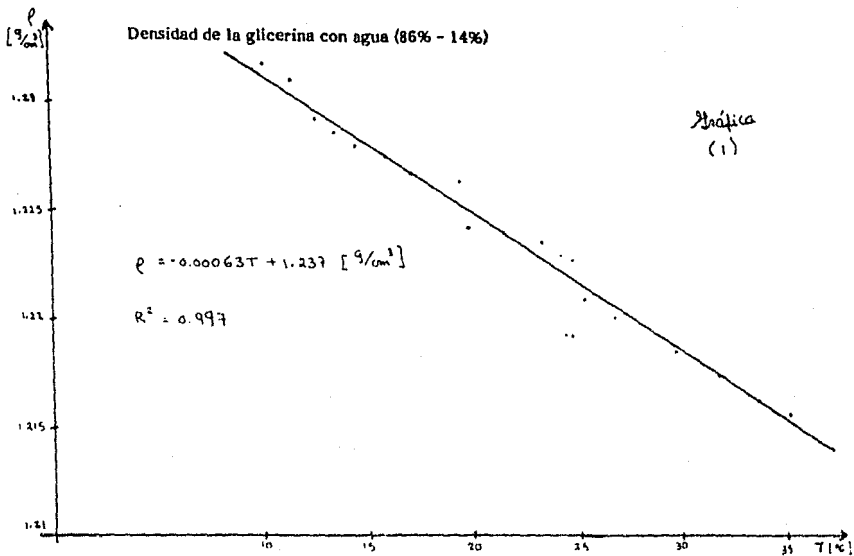
| $\frac{1}{T} [K^{-1}]$ | $\ln \mu [P]$ | $\frac{1}{T} [K^{-1}]$ | $\ln \mu [P]$ | $\frac{1}{T} [K^{-1}]$ | $\ln \mu [P]$ |
|------------------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| 0.00353 | 0.76547 | 0.00329 | -0.10536 | 0.003085 | -1.02165 |
| 0.00351 | 0.75612 | 0.00328 | -0.13926 | 0.003076 | -1.07881 |
| 0.00349 | 0.74194 | 0.00327 | -0.21072 | 0.003066 | -1.13943 |
| 0.00348 | 0.74194 | 0.00326 | -0.27444 | 0.003057 | -1.17118 |
| 0.00347 | 0.71784 | 0.00325 | -0.3147 | 0.003047 | -1.20397 |
| 0.00345 | 0.667829 | 0.00323 | -0.3857 | 0.003038 | -1.237874 |
| 0.00343 | 0.620576 | 0.00322 | -0.43078 | 0.003029 | -1.27297 |
| 0.00342 | 0.604316 | 0.00321 | -0.462035 | 0.003020 | -1.3093 |
| 0.00341 | 0.54233 | 0.0032 | -0.52763 | 0.003011 | -1.34707 |
| 0.0034 | 0.500775 | 0.00319 | -0.5621 | 0.003 | -1.427116 |
| 0.00339 | 0.41211 | 0.00318 | -0.5978 | 0.00299 | -1.46968 |
| 0.00338 | 0.35066 | 0.00317 | -0.6539 | 0.00298 | -1.51413 |
| 0.00337 | 0.29267 | 0.00316 | -0.71335 | 0.002975 | -1.56065 |
| 0.00335 | 0.27003 | 0.00315 | -0.7765 | 0.002966 | -1.6094 |
| 0.00334 | 0.22314 | 0.00314 | -0.7985 | 0.002957 | -1.60073 |
| 0.00333 | 0.09531 | 0.00313 | -0.82098 | 0.002949 | -1.71479 |
| 0.00332 | 0.01983 | 0.00312 | -0.84397 | 0.00294 | -1.771957 |
| 0.00331 | -0.05129 | 0.00311 | -0.89159 | 0.00293 | -1.771957 |
| 0.0033 | -0.07257 | 0.0031 | -0.94161 | 0.002914 | -1.83258 |
| | | 0.00309 | -0.99425 | 0.001897 | -1.83258 |

Con estos valores se obtiene la siguiente recta:

$$\ln \mu = -15.11 + \frac{4561.981}{T} \quad [\text{poiseo}]$$

con una

$$R^2 = 0.9955$$



| T [°C] | C _p [kJ/kg°C] |
|--------|--------------------------|
| 0 | 2.5348 |
| 2 | 2.5431 |
| 7 | 2.564 |
| 12 | 2.5924 |
| 15 | 2.61064 |
| 17 | 2.6221 |
| 22 | 2.6468 |
| 27 | 2.6723 |
| 32 | 2.69288 |
| 37 | 2.7263 |
| 42 | 2.7583 |
| 47 | 2.7902 |
| 52 | 2.8223 |
| 57 | 2.8544 |

Cuya recta está representada por:

$$C_p = 0.0052 T + 2.5271 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$$

donde $[T] = [^\circ\text{C}]$

y con una $R^2 = 0.9966$

Ya se dedujo que la mezcla de glicerina con agua es en una proporción del - 86% glicerina y 14% de agua; en base a esto, se consultó el Perry. "Chemical Engineer's Handbook" para obtener algunas otras propiedades de la mezcla.

| | |
|--|---------|
| Calor específico c_p $[\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]$ | |
| 15°C | 32°C |
| 2.61064 | 2.69288 |
| Conductividad térmica k $[\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}]$ | |
| 20°C | 0.31405 |

Estos valores son muy pocos para poder establecer como variarán estas propiedades con la temperatura y consultando el libro "The Properties of gases and liquids" se encontraron las siguientes correlaciones:

Calor específico

Para encontrar la capacidad calorífica a presión constante, c_p , de una mezcla de líquidos no hay correlaciones específicas, por lo cual uno se ve forzado a asumir que el c_p molar de la mezcla es una fracción molar de los valores de los componentes puros; es decir:

$$c_{p \text{ mezcla}} = X_1 c_{p1} + X_2 c_{p2}$$

donde

X_1 es la fracción molar del componente 1

c_{p1} es el calor específico molar del componente 1

Calor específico de la glicerina con agua.

Con base a la ecuación

$$c_{pm} = X_1 c_{p1} + X_2 c_{p2}$$

Tomando una mezcla 86% glicerina y 14% agua y los valores de los calores - específicos de la glicerina y del agua del apéndice A del libro "Fundamentals of heat transfer" de Frank Incropera obtenemos la siguiente tabla:

Conductividad térmica.

Para encontrar la conductividad térmica de una mezcla de líquidos existen - varias correlaciones:

Ecuación de Nel.

$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = \alpha \omega_2^{3/2} + \omega_2 (1 - \alpha)$$

donde $k_2 > k_1$,

ω_2 es el peso en fracción del componente 2

α es una constante de la mezcla.

Como generalmente α es desconocida se supone la unidad y el error que se tiene es menor al 4%.

Ecuación de Filippov

$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = c \omega_2^2 - \omega_2 (1 - c)$$

donde c es una constante de mezcla, normalmente se escoge $c = 0.72$

Relación de Power - Law

$$k_m^\tau = \omega_1 k_1^\tau + \omega_2 k_2^\tau$$

donde ω es la fracción en peso

$$\tau = -2 \quad \text{si} \quad 1 \leq \frac{k_2}{k_1} \leq 2$$

Conductividad térmica de la glicerina con agua.

Se tienen 3 correlaciones, para saber cual es la que nos da un menor error calcularé la conductividad térmica de la mezcla a 20°C, que es a la temperatura que tenemos un dato

dato $k = 0.31405 \quad [W/m \cdot ^\circ C] \quad \text{a } T = 20^\circ C$

Ecuación de Nel.

$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = \alpha \omega_2^{3/2} + \omega_2 (1 - \alpha)$$

tomando $\alpha = 1$

y como $k_2 > k_1$ tomaré al agua como componente 2

$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = 0.14^{3/2}$$

$$k_m = (0.0524)(0.6028 - 0.286) + 0.286 = 0.3026 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

$$\text{error} = \frac{0.3026 - 0.31405}{0.31405} \times 100 = -3.64\%$$

Jamieson and Hastings sugieren para esta ecuación una $\alpha = 0.49$

$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = 0.49(0.14)^{3/2} + 0.14(1 - 0.49) = 0.0971$$

$$k_m = 0.0971(0.6028 - 0.286) + 0.286 = 0.3168 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

$$\text{error} = \frac{0.3168 - 0.31405}{0.31405} \times 100 = 0.86\%$$

Ecuación de Filippov

$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = c \omega_2^2 - \omega_2 (1 - c)$$

con

$$c = 0.72$$

$$\begin{aligned} \frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} &= 0.72 (0.14)^2 - (0.14) (1 - 0.72) = 0.0141 - 0.0392 = \\ &= -0.0251 \end{aligned}$$

$$k_m = -0.0251 (0.6028 - 0.286) + 0.286 = 0.2781$$

$$\text{error} = \frac{0.2781 - 0.31405}{0.31405} \times 100 = -11.4472 \%$$

Relación de Power - Law

$$k_m^{\tau} = \omega_1 k_1^{\tau} + \omega_2 k_2^{\tau}$$

$$1 \leq \frac{k_2}{k_1} \leq 2$$

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{0.6028}{0.286} = 2.1077 > 2$$

esta relación no puede usarse.

Con base en lo anterior se usará la ecuación de Nel con la modificación propuesta por Jamieson and Hasting.

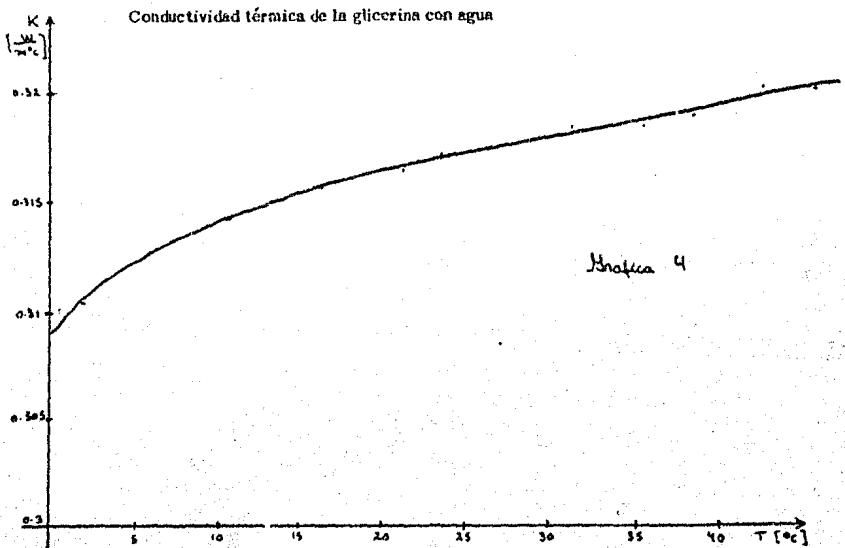
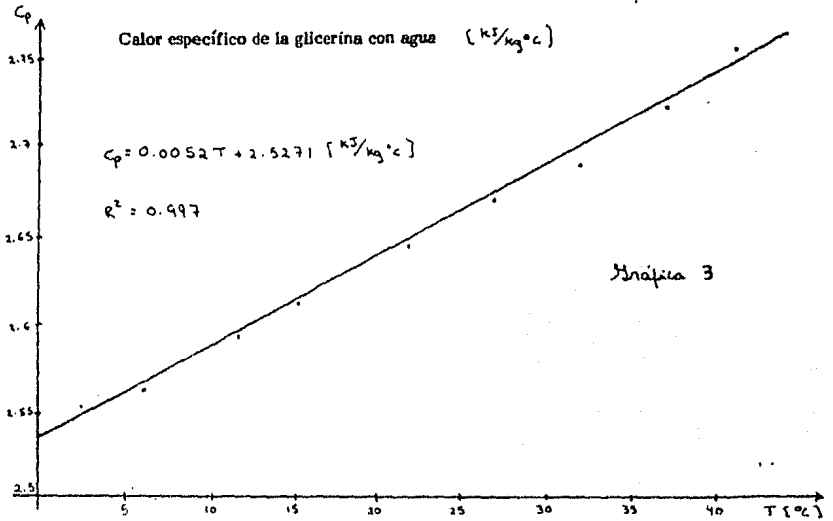
$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = 0.0971$$

$$\alpha = 0.49$$

$$k_m = 0.0971 (k_2 - k_1) + k_1 \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C]$$

| $T [^{\circ}C]$ | $K [W/m^{\circ}C]$ |
|-----------------|--------------------|
| 0 | 0.3089 |
| 2 | 0.3109 |
| 7 | 0.3129 |
| 12 | 0.3146 |
| 17 | 0.3164 |
| 20 | 0.3168 |
| 22 | 0.3171 |
| 27 | 0.3178 |
| 32 | 0.3184 |
| 37 | 0.3192 |
| 42 | 0.3202 |
| 47 | 0.3213 |
| 52 | 0.3222 |
| 57 | 0.3232 |

En la relación que se utilizó para obtener la conductividad térmica, no interviene la temperatura, por lo cual los valores tabulados en esta tabla no se prestan para obtener una ecuación representativa, por lo cual la conductividad térmica de la mezcla de glicerina con agua (86% - 14%) se obtendrá en la gráfica correspondiente, la gráfica 4



En resumen, las propiedades de la mezcla de glicerina con agua (86% glicerina, 14% agua) están representadas por las siguientes ecuaciones:

Densidad.

$$\rho = -0.00063 T + 1.2373 \quad [\text{g/cm}^3]$$

donde $[T] = [^{\circ}\text{C}]$

Viscosidad

$$\mu = -15.11 + \frac{4561.98}{T} \quad [\text{poises}]$$

donde $[T] = [K]$

Calor específico

$$c_p = 0.0052 T + 2.5271 \quad [\text{KJ/kg}^{\circ}\text{C}]$$

donde $[T] = [^{\circ}\text{C}]$

Conductividad térmica

Se obtendrá por medio de la gráfica 4

Densidad de la glicerina con fibrillas de carbón y grafito

| $T [^{\circ}C]$ | $\rho [g/cm^3]$ | $T [^{\circ}C]$ | $\rho [g/cm^3]$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10 | 1.2363 | 23 | 1.2271 |
| 12 | 1.23486 | 25 | 1.22689 |
| 13 | 1.23283 | 26 | 1.2256 |
| 14 | 1.23196 | 28 | 1.2251 |
| 15 | 1.23183 | 30 | 1.22493 |
| 17 | 1.23 | 31 | 1.224 |
| 18 | 1.22972 | 32 | 1.2229 |
| 19 | 1.22924 | 33 | 1.22127 |
| 20 | 1.22813 | 34 | 1.22 |
| 22 | 1.2276 | 35 | 1.21876 |

Estos datos experimentales se obtuvieron con un picnómetro de un volumen de 48.8192 cm^3 y una masa de 43.9137 g .

La recta que representa estos puntos es:

$$\rho = -0.00059T + 1.241 \quad [g/cm^3]$$

donde $[T] = [^{\circ}C]$

con una

$$R^2 = 0.963$$

Viscosidad de la glicerina con fibrillas de carbón y grafito

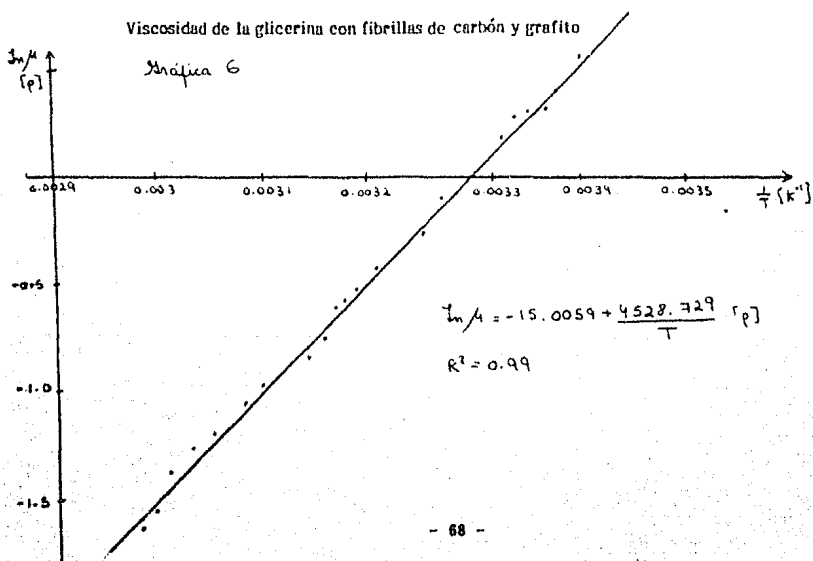
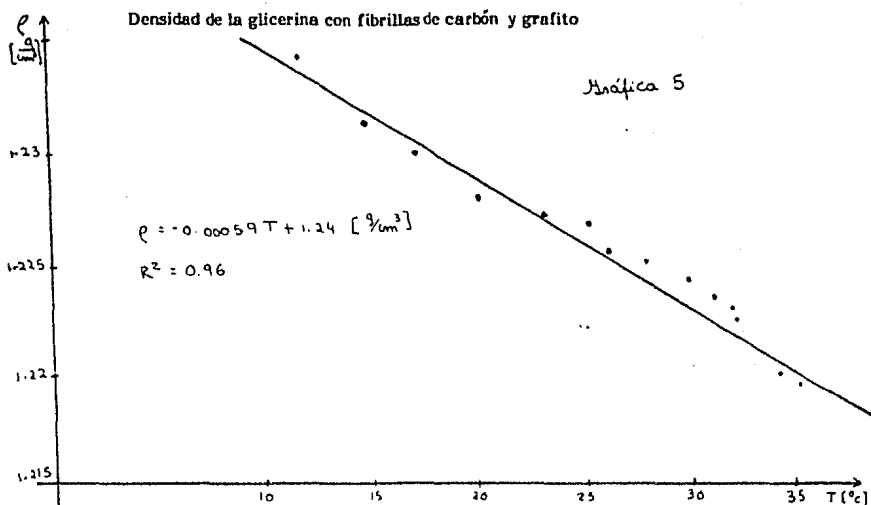
| $\frac{1}{T} [K^{-1}]$ | $\ln \mu [P]$ | $\frac{1}{T} [K^{-1}]$ | $\ln \mu [P]$ | $\frac{1}{T} [K^{-1}]$ | $\ln \mu [P]$ |
|------------------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| 0.00354 | 0.78846 | 0.00333 | 0.18232 | 0.0031 | -0.96758 |
| 0.00353 | 0.76547 | 0.00332 | 0.07696 | 0.00309 | -1.04982 |
| 0.003513 | 0.76081 | 0.00331 | 0.04879 | 0.00308 | -1.07881 |
| 0.003507 | 0.75142 | 0.00330 | 0.00995 | 0.00305 | -1.20397 |
| 0.00349 | 0.74194 | 0.00329 | -0.06188 | 0.00304 | -1.23787 |
| 0.00348 | 0.73237 | 0.00327 | -0.11653 | 0.00303 | -1.27297 |
| 0.00347 | 0.67803 | 0.00326 | -0.24846 | 0.00302 | -1.34707 |
| 0.00346 | 0.66783 | 0.00325 | -0.30111 | 0.00301 | -1.38629 |
| 0.00345 | 0.65752 | 0.00323 | -0.38566 | 0.00298 | -1.46968 |
| 0.00343 | 0.64185 | 0.00321 | -0.43078 | 0.00297 | -1.60944 |
| 0.0034 | 0.53063 | 0.00319 | -0.52763 | 0.00296 | -1.60944 |
| 0.00339 | 0.45742 | 0.00318 | -0.57982 | 0.00295 | -1.66073 |
| 0.00338 | 0.37844 | 0.00317 | -0.63488 | 0.00293 | -1.77196 |
| 0.00337 | 0.30748 | 0.00316 | -0.71335 | 0.00291 | -1.89712 |
| 0.00335 | 0.27003 | 0.00315 | -0.82098 | 0.0029 | -1.89712 |
| 0.00334 | 0.25464 | 0.00312 | -0.91629 | 0.00289 | -1.96611 |

Con estos valores se obtiene la siguiente recta

$$\ln \mu = -15.0059 + \frac{4528.729}{T} \quad [\text{poise}]$$

donde $[T] = [K]$

con una $R^2 = 0.99236$



La mezcla de glicerina (86% glicerina - 14% agua) con fibrillas de carbón - tiene tanto la densidad como la viscosidad muy parecida a la de la glicerina sin fibrillas, debido a esto, las otras propiedades, que para la glicerina se sacaron por medio de correlaciones, se considerarán válidas para la presente mezcla, por lo tanto las - propiedades de la glicerina con fibrillas nos quedan representadas por las siguientes propiedades:

Densidad

$$\rho = -0.00059 T + 1.241 \quad [g/cm^3]$$

donde $[T] = [^{\circ}C]$

Viscosidad

$$\ln \mu = -15.0059 + \frac{4528.729}{T} \quad [p]$$

donde $[T] = [K]$

Calor específico

$$C_p = 0.0052 T + 2.5271 \quad [kJ/kg^{\circ}C]$$

donde $[T] = [^{\circ}C]$

Conductividad térmica.

Se obtendrá en la gráfica 4

Propiedades del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada.

Todas las propiedades del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y la de cualquier solución acuosa de polímeros a baja concentración puede considerarse iguales a las del agua, a excepción de la viscosidad. Esta afirmación puede hacerse con base en los estudios realizados por S.S. Yoo, James P. Hartnett y Milivoje Kostic.

Por lo tanto se tiene que la densidad del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada, es la del agua:

| $T [^{\circ}C]$ | $\rho [g/cm^3]$ |
|-----------------|-----------------|
| 0 | 0.9998 |
| 4 | 0.9998 |
| 10 | 0.9992 |
| 15.5 | 0.9986 |
| 21 | 0.9974 |
| 27 | 0.9958 |
| 32 | 0.9949 |
| 38 | 0.993 |
| 43 | 0.9905 |
| 49 | 0.9888 |
| 54 | 0.9857 |
| 60 | 0.9833 |

Tomada de Brown y Marco "Introduction to heat transfer".

Todas las demás propiedades, excepto la viscosidad serán tomadas del apéndice de Incropera "Fundamentals of heat transfer", tabla A.6.

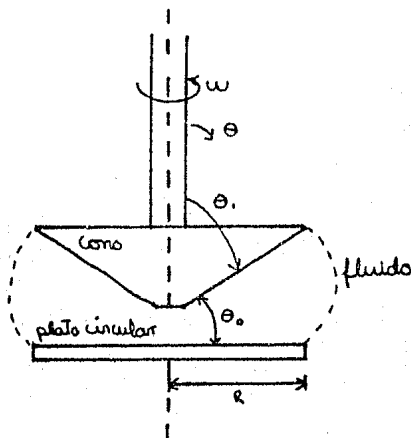
Viscosidad del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada.

La viscosidad de este fluido viscoelástico se midió en función de una rapidez de deformación, utilizando un reogoniómetro Weissenberg del tipo cono-plato.

La geometría cono-plato se ha vuelto muy popular en los años recientes para la medición de la viscosidad y de otras propiedades reológicas, como N_1 . En esta geometría se deben considerar las siguientes relaciones analíticas para interpretar los datos del instrumento:

- 1) Una relación entre la velocidad angular ω y la componente Θ_{ϕ} del tensor de rapidez de deformación $\dot{\gamma}$ en el claro entre plato y cono.
- 2) Una relación entre el torque τ y la componente Θ_{ϕ} del tensor de deformación ∇ en el claro.
- 3) Una relación que nos dé la viscosidad μ en términos de la velocidad angular ω y el torque τ

Tenemos la siguiente configuración:



En los instrumentos comerciales el ángulo θ_0 usualmente se encuentra en 0.5 a 8 grados. Como este ángulo es tan pequeño el flujo puede considerarse como entre dos platos paralelos.

Relaciones analíticas.

1) Velocidad v_{θ} a un radio R

Para el sistema cono-plato, la velocidad del cono puede representarse por ωR ; se tiene que la separación entre plato y cono es de $R \sin \theta_0$ pero como θ_0 es muy pequeño $R \sin \theta_0 \approx R \theta_0$. Por lo tanto una buena aproximación del perfil de velocidades es:

$$v_{\theta} = \omega R \left(\frac{\pi/2 - \theta}{\pi/2 - \theta_1} \right)$$

La componente $\theta\phi$ del tensor $\dot{\gamma}$ es:

$$\dot{\gamma}_{\theta\phi} = -\frac{\omega}{\theta_0}$$

En esta ecuación se observa que $\dot{\gamma}_{\theta\phi}$ es constante para el arreglo de cono-plato y esta es una de las razones por las cuales este instrumento es útil para fluidos macromoleculares, donde la viscosidad depende de la rapidez de deformación.

2) El torque necesario para mantener el movimiento.

Como $\dot{\gamma}_{\theta\phi}$ es constante, entonces $\tau_{\theta\phi}$ debe ser también constante.

3) Relación para obtener la viscosidad.

Para un fluido newtoniano tenemos que $\tau = \mu \dot{\gamma}$, en nuestro sistema sabemos que las componentes $\theta\phi$ tanto del esfuerzo cortante τ , como de la rapidez de deformación $\dot{\gamma}$, son constantes, por lo cual de la ecuación anterior podemos despejar la viscosidad

$$\mu = \frac{\tau_{\theta\phi}}{-\dot{\gamma}_{\theta\phi}} = \frac{3 \mathcal{T} K_T \theta_0}{2 \pi R^3 \omega} \quad [\text{poise}]$$

Esta ecuación nos da la viscosidad del fluido en términos de las cantidades geométricas R y θ_0 y de la medición del torque \mathcal{T} y de la velocidad angular ω

$$\mu = \frac{3}{2\pi} \frac{\mathcal{T} \theta_0 K_T}{R^3 \omega}$$

donde

- K_T = constante de la barrera de torsión
- J = torque o par torsional [N]
- θ_0 = ángulo del cono [rad]
- R = radio del plato [cm]
- ω = velocidad angular [rad/s]

si se desea meter el ángulo en grado, tenemos que $180^\circ = \pi$

$$\mu = \frac{3\pi}{2\pi(180)} \frac{J \theta_0 K_T}{R^3 \omega} = \frac{K_T \theta_0 J}{120 \omega R^3} \quad [\text{paises}]$$

Para el reogniómetro que se utilizó tenemos que:

$$\mu = \frac{K_T \theta_0 J}{120 \omega R^3} \quad [\text{paises}]$$

donde

- $K_T = 10.2$
- $\theta_0 = 1.9858^\circ$
- $R = 3.75 \text{ cm}$
- $[\omega] = [\text{rad/s}]$
- $[J] = [\text{N}]$

Los valores que se obtuvieron para diferentes temperaturas son los siguientes:

$$\text{donde } \mu = \frac{10.2 (1.9858)}{120 (3.75)^3} \frac{J}{\omega} \quad [\text{paises}]$$

$$\gamma = \frac{\omega}{\theta_0} = \frac{\omega [\text{rad/s}]}{0.0347 [\text{rad}]} = [\text{s}^{-1}]$$

para $T = 19^\circ\text{C}$

| $\delta [\text{s}^{-1}]$ | $\mu [\rho]$ |
|--------------------------|--------------|
| 0.1082 | 62.31 |
| 0.2161 | 47.275 |
| 0.429 | 36.728 |
| 0.8581 | 26.638 |
| 1.7162 | 17.893 |
| 3.4142 | 12.037 |
| 6.8287 | 7.844 |
| 13.5968 | 5.043 |

para $T = 26^{\circ}\text{C}$

| $\delta [\text{s}^{-1}]$ | $\mu [\text{P}]$ |
|--------------------------|------------------|
| 0.1082 | 57.401 |
| 0.2161 | 45.94 |
| 0.429 | 35.383 |
| 0.8581 | 26.1 |
| 1.7162 | 17.624 |
| 3.4142 | 11.834 |
| 6.8287 | 6.709 |
| 13.5968 | 4.975 |

para $T = 40^{\circ}\text{C}$

| $\delta [\text{s}^{-1}]$ | $\mu [\text{P}]$ |
|--------------------------|------------------|
| 0.1082 | 48.439 |
| 0.2161 | 34.615 |
| 0.429 | 26.772 |
| 0.8581 | 19.44 |
| 1.7162 | 13.991 |
| 3.4142 | 9.4 |
| 6.8287 | 5.221 |
| 13.5968 | 4.042 |

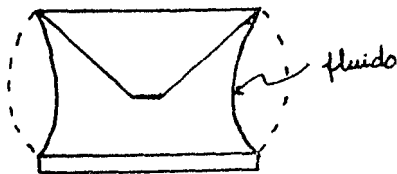
para $T = 47^{\circ}\text{C}$

| $\delta [\text{s}^{-1}]$ | $\mu [\text{P}]$ |
|--------------------------|------------------|
| 0.1082 | 43.531 |
| 0.2161 | 32.853 |
| 0.429 | 23.678 |
| 0.8581 | 16.615 |
| 1.7162 | 12.696 |
| 3.4142 | 8.929 |
| 6.8287 | 4.816 |
| 13.5968 | 3.804 |

para $T = 54^{\circ}\text{C}$

| $\delta [\text{s}^{-1}]$ | $\mu [\text{P}]$ |
|--------------------------|------------------|
| 0.1082 | 41.1838 |
| 0.2161 | 28.2048 |
| 0.429 | 23.4088 |
| 0.8581 | 16.4893 |
| 1.7162 | 10.9152 |
| 3.4142 | 7.3855 |
| 6.8287 | 3.4774 |
| 13.5968 | 2.6339 |

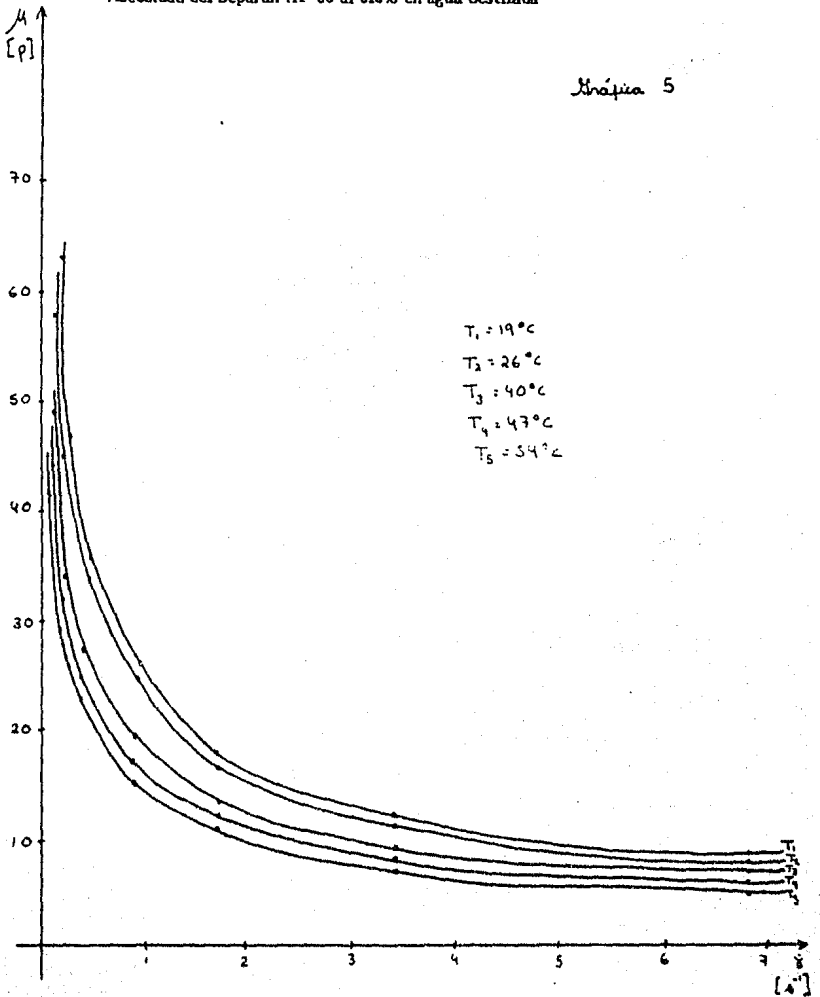
Se pretendía obtener la viscosidad de nuestra solución hasta aproximadamente 65°C pero a partir de aproximadamente 40°C, el agua de nuestra solución se empezó a evaporar.



Esto se debe a que es muy poca la cantidad de solución que se pone en el claro entre el plato y el cono, y el aparato tarda mucho en calentarla, entonces el aire caliente seco, sediento de humedad absorbe el agua de la solución, provocando que disminuya la cantidad de solución y por lo tanto las lecturas tomadas no son verdicas. Este problema se pudo controlar un poco hasta los 54°C, (en la gráfica 5 puede notarse que las curvas de la viscosidad a partir de los 40°C no son perfectamente paralelas a las de menor temperatura), pero ya para 60°C fue imposible controlar este fenómeno. Por esta razón sólo se trabajará la solución hasta aproximadamente 54°C.

Viscosidad del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada

Gráfica 5



Calor específico del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada (calor específico del agua).

| $T [^{\circ}C]$ | $c_p [kT/kg \cdot k]$ |
|-----------------|-----------------------|
| 0 | 4.217 |
| 2 | 4.211 |
| 7 | 4.198 |
| 12 | 4.189 |
| 17 | 4.184 |
| 22 | 4.181 |
| 27 | 4.179 |
| 32 | 4.178 |
| 37 | 4.178 |
| 42 | 4.179 |
| 47 | 4.18 |
| 52 | 4.182 |
| 57 | 4.184 |

Observando los valores en la tabla y la gráfica 6 vemos que no siguen una curva que pueda ser representada por una ecuación, por lo tanto para obtener un valor determinado será necesario recurrir a la gráfica 6

Capacidad térmica del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada (capacidad térmica del agua).

| $T [^{\circ}\text{C}]$ | $K [\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot \text{K}]$ |
|------------------------|--|
| 0 | 0.659 |
| 2 | 0.574 |
| 7 | 0.582 |
| 12 | 0.59 |
| 17 | 0.598 |
| 22 | 0.606 |
| 27 | 0.613 |
| 32 | 0.62 |
| 37 | 0.628 |
| 42 | 0.634 |
| 47 | 0.64 |
| 52 | 0.645 |
| 57 | 0.65 |

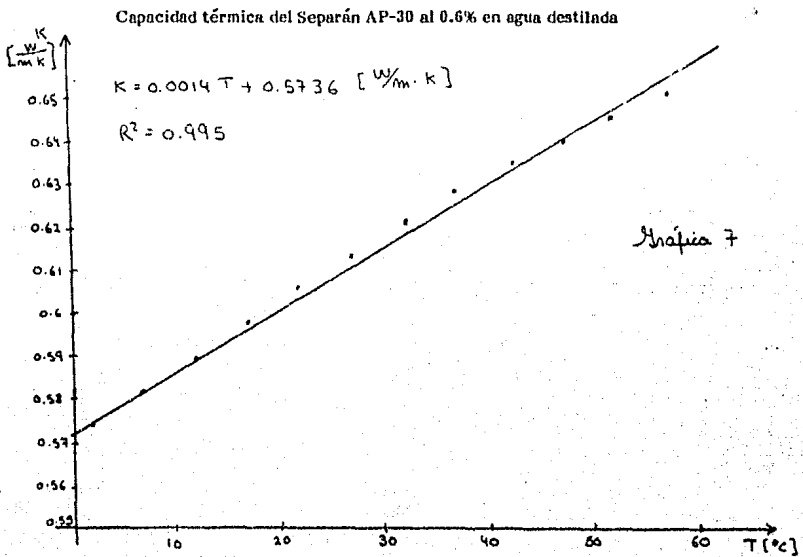
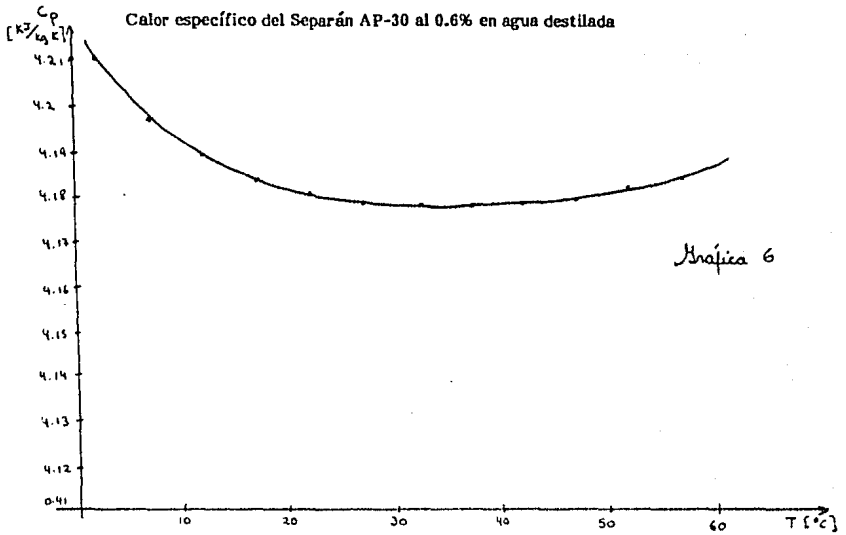
Si eliminamos el valor a una temperatura de 0°C (que no utilizaré), los valores tabulados podrían ser representados por la siguiente recta

$$K = 0.0014T + 0.5736 \quad [\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot \text{K}]$$

donde $[T] = [^{\circ}\text{C}]$

con una

$$R^2 = 0.9945$$



Propiedades del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada con fibrillas de carbón y grafito.

Todas las propiedades, excepto la viscosidad, son, como en el caso de la solución de Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada, las del agua (como ya se expusieron anteriormente, no las repetiré).

La viscosidad del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada con fibrillas de carbón, es muy parecida a la de la misma solución sin fibrillas; pero en este caso se presentaron mayores problemas para encontrar los valores en el reogniómetro; a cada temperatura se sacaron tres corridas y cada una, en varios casos, salían diferentes, para tratar de tomar un valor representativo se sacó el valor medio de las corridas, obteniéndose los siguientes datos:

para $T = 20^{\circ}\text{C}$

| $\delta \text{ (K}^{-1}\text{)}$ | $\mu \text{ (p)}$ |
|----------------------------------|-------------------|
| 0.1082 | 61.4557 |
| 0.2161 | 49.3584 |
| 0.429 | 37.1132 |
| 0.8581 | 29.7362 |
| 1.7162 | 18.6239 |
| 3.4142 | 12.1049 |
| 6.8287 | 8.7765 |
| 13.3968 | 6.1282 |

para $T = 28^{\circ}\text{C}$

| $\delta \text{ (K}^{-1}\text{)}$ | $\mu \text{ (p)}$ |
|----------------------------------|-------------------|
| 0.1082 | 57.4013 |
| 0.2161 | 45.9396 |
| 0.429 | 35.8039 |
| 0.8581 | 24.1265 |
| 1.7162 | 17.7584 |
| 3.4142 | 11.1049 |
| 6.8287 | 7.9794 |
| 13.5968 | 5.2301 |

T = 38°C

| $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹] | μ [p] |
|-----------------------------------|-----------|
| 0.1082 | 50.1461 |
| 0.2161 | 36.4697 |
| 0.429 | 28.934 |
| 0.8581 | 20.9692 |
| 1.7162 | 15.9713 |
| 3.4142 | 10.0761 |
| 6.8287 | 6.965 |
| 13.5968 | 4.8905 |

para T = 48°C

| $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹] | μ [p] |
|-----------------------------------|-----------|
| 0.1082 | 46.3762 |
| 0.2161 | 35.3956 |
| 0.429 | 26.4448 |
| 0.8581 | 18.9378 |
| 1.7162 | 13.9568 |
| 3.4142 | 8.656 |
| 6.8287 | 5.8831 |
| 13.5968 | 3.9848 |

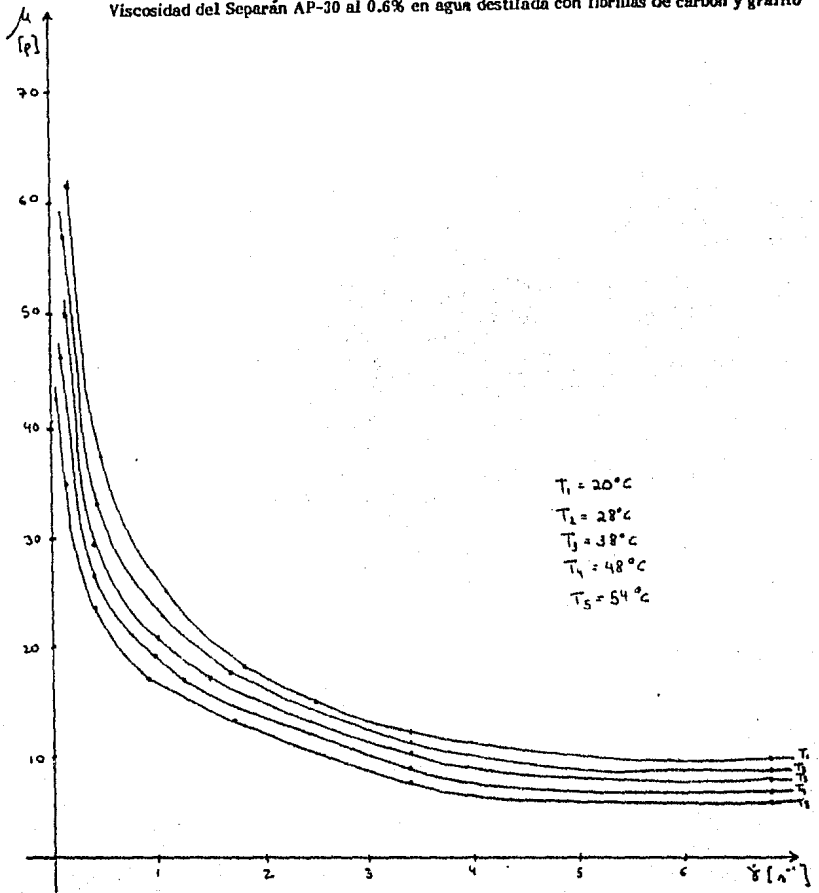
para T = 54°C

| $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹] | μ [p] |
|-----------------------------------|-----------|
| 0.1082 | 43.2465 |
| 0.2161 | 29.2019 |
| 0.429 | 23.642 |
| 0.8581 | 17.1306 |
| 1.7162 | 12.9734 |
| 3.4142 | 8.115 |
| 6.8287 | 5.4097 |
| 13.5968 | 3.5339 |

Nuevamente, a la temperatura más alta a la que se pudo obtener la viscosidad en el reogoniómetro fué 54°C, porque se presenta el problema de la evaporación del

agua de la solución, debido a que el aire caliente seco, tiende a absorberla. Debido a esta situación las pruebas que se harán son hasta aproximadamente 54°C.

Viscosidad del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada con fibrillas de carbón y grafito



APARATO EXPERIMENTAL

APARATO EXPERIMENTAL

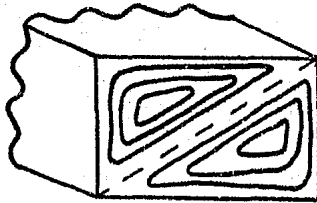
El experimento se llevó a cabo en un aparato diseñado en el Instituto de Investigación de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México. Consta de una tubería rectangular, que se encuentra dentro de un tanque de calentamiento, el cual se llena de agua para mantener la pared de la tubería a una temperatura constante.

Se realizó en una tubería rectangular porque, de estudios realizados anteriormente, se llegó a la conclusión de que independientemente del fluido, es la geometría, de la tubería, que crea el coeficiente de transferencia de calor máximo. Comparando con tubería circular, cuadrada y triangular.

En la tubería rectangular tenemos la mayor resistencia al flujo. En un fluido newtoniano la resistencia a fluir en un tubo depende de la sección transversal del mismo, es decir, de la geometría.

En un fluido no newtoniano, la resistencia a fluir depende no solo de la sección transversal del tubo, sino también de la existencia de flujos secundarios, debidos a diferencias de esfuerzos normales y en particular a la segunda diferencia de esfuerzos normales. Estos flujos secundarios no aparecen en las tuberías de sección no circular (rectangular), para fluidos newtonianos ya que no existen diferencias de esfuerzos normales.

El flujo secundario en tuberías rectangulares, se ilustra por medio de las líneas de corriente en la sección transversal de la tubería rectangular, para un fluido no newtoniano.



Pero los efectos de estos flujos secundarios sobre el gasto son muy pequeños,

por lo cual no se toman en cuenta, pero tienen una gran influencia en el coeficiente de transferencia de calor. Esta afirmación se comprobó experimentalmente.

La tubería rectangular es de aluminio y sus dimensiones son:

| | |
|---------------------|-----------------------|
| medidas interiores: | 2.19 [cm] x 0.90 [cm] |
| medidas exteriores: | 2.58 [cm] x 1.33 [cm] |

En la tubería se insertaron 8 termopares, de los cuales uno se encuentra afuera de la sección en estudio, para saber la temperatura a la que entra el fluido en estudio. Los siete termopares restantes están distribuidos a espacios iguales, dentro de nuestra sección en estudio (el tanque de calentamiento), a lo largo de la tubería, para medir la temperatura en diferentes puntos de la tubería.

La parte de la tubería que se encuentra dentro de la sección en estudio se encuentra sumergida en agua, la cual se calienta por medio de un calentador de resistencia que cuenta con una parrilla para controlar los aumentos de temperatura y se tiene un agitador para asegurar que toda el agua contenida en el tanque de calentamiento se encuentre a la misma temperatura.

Además de los termopares insertados en la tubería se cuenta con tres termopares más, uno al principio, uno en medio y otro al final de la sección de pruebas, para medir la temperatura del agua, que es la misma que la temperatura de la pared de la tubería.

Todos los termopares se encuentran conectados a un adquisidor de datos - - - Hewlett-Packard, el cual está interconectado con una calculadora 41CV y una cassettera de la misma marca, formando un circuito cerrado.

Las temperaturas las toma el adquisidor y se graban en un cassette por medio de un programa en la calculadora. Y se leen del cassette en la calculadora, por medio de otro programa.

Programa para la toma de datos.

| | | | |
|----|----------|----|------------|
| 01 | LbL LECT | 26 | XEQ IND |
| 02 | 2 | 27 | STO IND 10 |

| | | | |
|----|------------------|----|----------|
| 03 | STO 01 | 28 | RCL 10 |
| 04 | 12 | 29 | RCL 11 |
| 05 | STO 10 | 30 | X > Y ? |
| 06 | 9 | 31 | GOTO 04 |
| 07 | STO 00 | 32 | GOTO 05 |
| 08 | 17 | 33 | LbL 04 |
| 09 | STO 11 | 34 | 1 |
| 10 | INT 3421 | 35 | STO + 10 |
| 11 | "TEM 2-9, 12-17" | 36 | GOTO 03 |
| 12 | OUT A | 37 | LbL 05 |
| 13 | LbL 01 | 38 | "LOLA" |
| 14 | XEQ IND | 39 | ARCL 20 |
| 15 | STO IND 01 | 40 | 20 |
| 16 | RCL 01 | 41 | CREATE |
| 17 | RCL 00 | 42 | 0 |
| 18 | X > Y ? | 43 | SEEKR |
| 19 | GOTO 02 | 44 | 2.009 |
| 20 | GOTO 03 | 45 | WRTRX |
| 21 | LbL 02 | 46 | 12.017 |
| 22 | 1 | 47 | WRTRX |
| 23 | STO + 01 | 48 | 1 |
| 24 | GOTO 01 | 49 | STO + 20 |
| 25 | LbL 03 | 50 | END |

Programa para que el experimentador vea los datos.

| | | | |
|----|------------|----|----------|
| 01 | LbL LEA | 27 | GOTO 07 |
| 02 | 2 | 28 | GOTO 08 |
| 03 | STO 21 | 29 | LbL 07 |
| 04 | 9 | 30 | 1 |
| 05 | STO 00 | 31 | STO + 21 |
| 06 | 17 | 32 | GOTO 06 |
| 07 | STO 11 | 33 | LbL 08 |
| 08 | 12 | 34 | RCL 22 |
| 09 | STO 22 | 35 | READ RX |
| 10 | FIX 1 | 36 | CLA |
| 11 | "ARCHIVO?" | 37 | ARCL 22 |

| | | | |
|----|-------------|----|-------------|
| 12 | PROMPT | 38 | APPEND = |
| 13 | 0 | 39 | ARCL IND 22 |
| 14 | SEEKR | 40 | AVIEW |
| 15 | LbL 06 | 41 | STOP |
| 16 | RCL 21 | 42 | RCL 22 |
| 17 | READ RX | 43 | RCL 11 |
| 18 | CLA | 44 | X > Y ? |
| 19 | ARCL 21 | 45 | GOTO 09 |
| 20 | APPEND = | 46 | GOTO 10 |
| 21 | ARCL IND 21 | 47 | LbL 09 |
| 22 | AVIEW | 48 | 1 |
| 23 | STOP | 49 | STO + 22 |
| 24 | RCL 21 | 50 | GOTO 08 |
| 25 | RCL 00 | 51 | LbL 10 |
| 26 | X > Y ? | 52 | END |

La caída de presión se obtiene por medio de un transductor conectado a un - amplificador y a un amperímetro. En el amperímetro se obtiene una corriente y ésta se transforma a una presión. Esto se hace conforme a la ecuación obtenida de la ca - libración del transductor.

$$\frac{\Delta P}{L} = 25.08 I - 0.33 \left[\frac{\text{dina}}{\text{cm}} \right]$$

donde $[I] = [mA]$

esta ecuación es válida para todos los fluidos con los que se trabajará.

Calibración del transductor

| I [mA] | Δh [cm] | $\Delta P/L$ [$\frac{\text{dina}}{\text{cm}}$] |
|--------|-----------------|--|
| 0 | 0 | 0 |
| 0.06 | 0.1 | 0.6317 |
| 0.16 | 0.7 | 4.4218 |
| 0.17 | 0.8 | 5.0534 |
| 0.27 | 1 | 6.3168 |
| 0.30 | 1.3 | 8.2118 |
| 0.34 | 1.5 | 9.4752 |
| 0.35 | 1.6 | 10.1069 |
| 0.49 | 2 | 12.6336 |
| 0.50 | 2.2 | 13.8970 |
| 0.54 | 2.3 | 14.5287 |
| 0.69 | 2.8 | 17.6871 |
| 0.71 | 2.9 | 18.3187 |
| 0.81 | 3.3 | 20.8455 |
| 0.85 | 3.5 | 22.1088 |
| 1.03 | 3.6 | 22.7405 |
| 1.10 | 4.1 | 25.8989 |
| 1.12 | 4.3 | 27.1623 |
| 1.13 | 4.4 | 27.7939 |
| 1.15 | 4.5 | 28.4256 |
| 1.32 | 5 | 31.5840 |
| 1.35 | 5.1 | 32.2157 |
| 1.39 | 5.4 | 34.1108 |
| 1.42 | 5.7 | 36.0058 |
| 1.46 | 5.9 | 37.2692 |
| 1.54 | 6 | 37.9008 |
| 1.58 | 6.2 | 39.1642 |
| 1.64 | 6.4 | 40.4276 |
| 1.72 | 6.5 | 41.0592 |
| 1.79 | 7.1 | 44.8493 |
| 2.01 | 7.4 | 46.7444 |
| 2.18 | 8 | 50.5344 |

| I [mA] | Δh [cm] | $\Delta P/L$ [$\frac{\text{dina}}{\text{cm}}$] |
|--------|-----------------|--|
| 2.19 | 8.1 | 51.1661 |
| 2.32 | 8.6 | 54.3245 |
| 2.33 | 9 | 56.8513 |
| 2.49 | 9.4 | 59.378 |
| 2.61 | 10.4 | 65.6948 |
| 2.82 | 10.8 | 68.2215 |
| 2.83 | 11.4 | 72.0116 |
| 2.91 | 11.8 | 74.5383 |
| 2.93 | 12 | 75.8017 |
| 3.0 | 12.3 | 77.6967 |
| 3.27 | 13 | 82.1185 |
| 3.28 | 13.3 | 84.0135 |
| 3.41 | 13.9 | 87.8036 |
| 3.52 | 14.5 | 91.5937 |
| 3.56 | 15 | 94.7521 |

Para la calibración del transductor se utilizó agua destilada a una temperatura constante; en cada salida del transductor se colocó un tubo de vidrio, para formar un manómetro en U, donde la curva de la U es el transductor. Primero una columna se mantuvo a nivel constante, variando la columna de agua del otro tubo y después se mantuvo constante esta segunda columna, variando la primera. Obteniendo las diferencias de alturas y las corrientes indicadas en la tabulación.

Obtención de $\frac{\Delta P}{L}$

$$\Delta P = \rho g h$$

líquido: agua destilada

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$g = 981 \text{ cm/s}^2$$

$$\Delta P = 981 h$$

$$L = 155.3 \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 6.3168 h$$

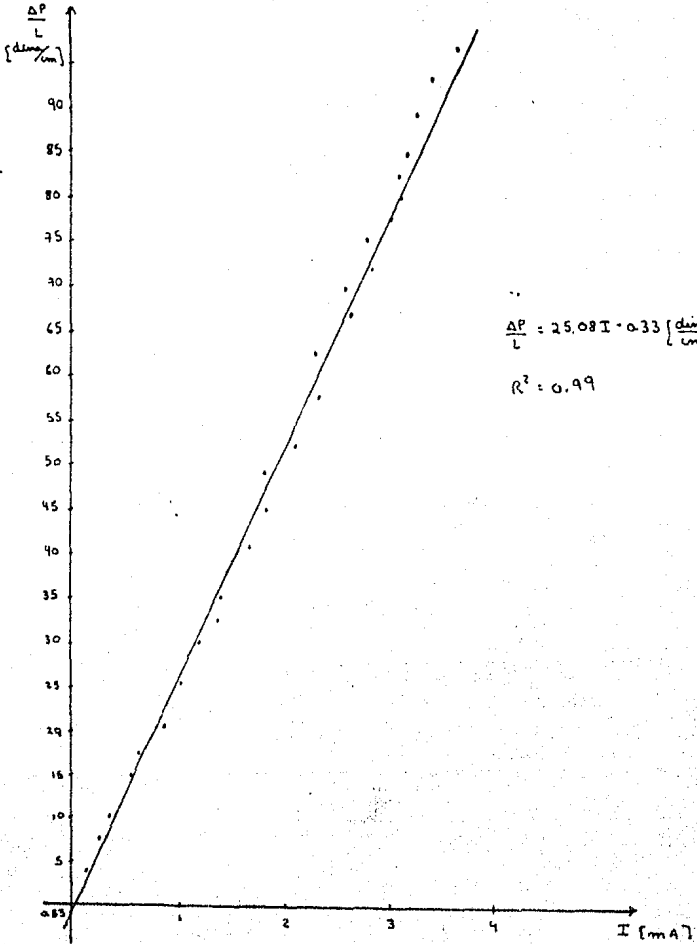
Obteniendo la recta aproximada de los puntos tabulados

$$\frac{\Delta P}{L} = 25.08 I - 0.33 \text{ [dina/cm]}$$

con una

$$R^2 = 0.9940$$

Calibración del transductor.



El fluido, después de pasar por la sección de prueba, (la tubería), por medio de una manguera pasa a un primer depósito donde se obtiene el gasto másico por medio de una probeta y un cronómetro. La medición del gasto se lleva a cabo acumulando en la probeta el fluido que cae de la manguera antes de llegar al depósito.

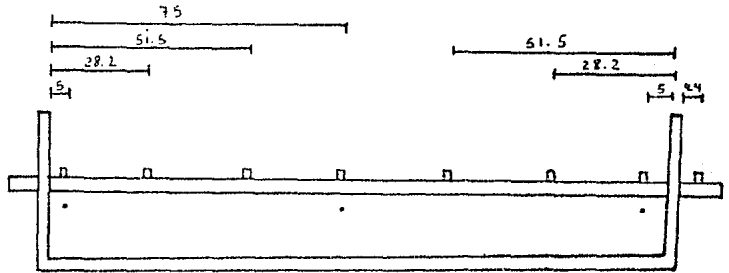
De este primer depósito por medio de una bomba peristáltica se traslada a un segundo depósito, donde se mantiene un nivel constante. De este segundo depósito sale el fluido hacia la tubería y por lo tanto hacia la sección de pruebas.

El recorrido del fluido es el siguiente: del segundo tanque de almacenamiento sale por gravedad, a través de una manguera hacia la tubería rectangular, dentro de ésta entra al tanque de calentamiento lleno de agua la cual se calienta por el calentador de resistencia y la agita el agitador. Dentro de la tubería rectangular el fluido va aumentando su temperatura, la cual es tomada por el adquisidor de datos modelo 3421A Hewlett-Packard, el cual mide diferencias de potencial y ésta la transforma a temperaturas, con una confiabilidad, dada por el fabricante, de ± 1 ° C, estos datos de temperaturas se graban en la cassettera modelo 82161A de Hewlett-Packard, por medio de la calculadora 41CV, de la misma marca. Esto se hace para facilitar, posteriormente, la recopilación de los datos.

El fluido deja la sección de prueba y por medio de otra manguera es conducido al primer depósito donde se toma el gasto másico y de aquí, a través de una manguera tygon N° 6408-45, conectada en una bomba peristáltica masterflex modelo N° 7015 se traslada al segundo depósito para iniciar de nuevo el ciclo.

Diseño experimental.

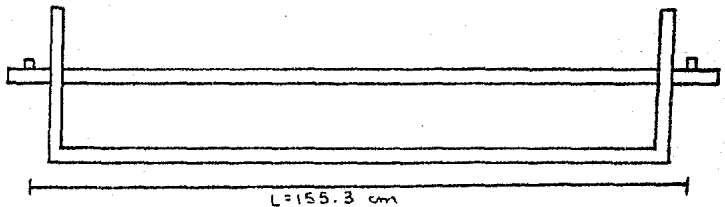
termopares:



acotaciones en cm.

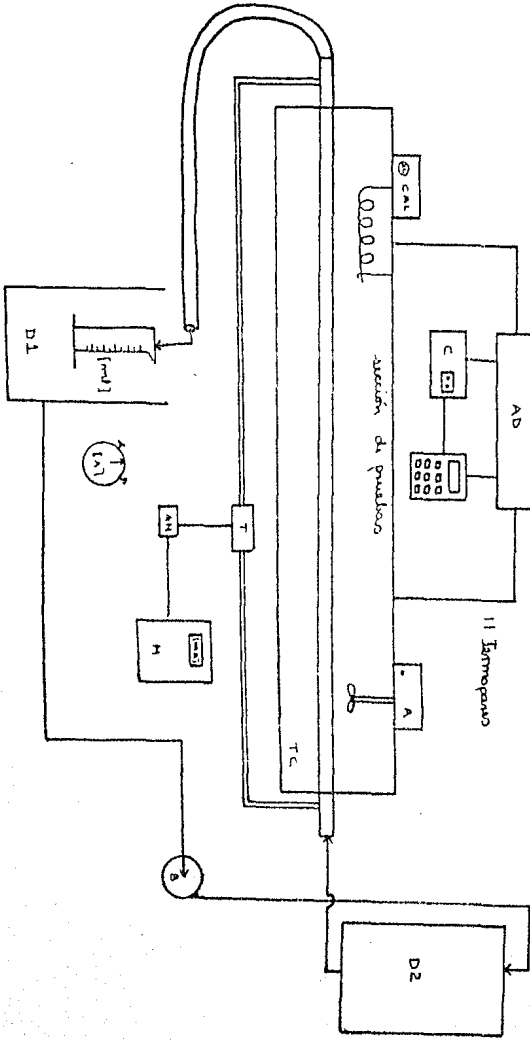
- termopares que se encuentran en el interior de la tubería, para medir la temperatura del fluido en estudio.
- termopares que se encuentran en el exterior de la tubería, para medir la temperatura del agua.

toma de presión.



- salida de la manguera tygon que está conectada al transductor para la toma de presión.

Aparato



- D1 - primer depósito
- D2 - segundo depósito
- B - bomba peristáltica
- T - transductor
- AM - amplificador
- M - multímetro
- CAL - calentador
- A - agitador
- TC - tanque de calentamiento
- Ad - adquisidor de datos
- C - cassetteira

**PROPIEDADES DE LOS
FLUIDOS EN ESTUDIO.**

En el aparato experimental que se utilizó para el presente estudio se obtuvieron tres variables; una corriente I en $[mA]$, que se utilizó para obtener la caída de presión $\Delta P/L$, relacionadas, para todos los fluidos, por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta P}{L} = 25.08 I - 0.33 \left[\frac{dina}{cm} \right]$$

Las otras dos variables son un volumen V en $[ml]$ y un tiempo t en $[s]$, los cuales se utilizan para obtener el gasto volumétrico,

$$Q = \frac{V}{t} \left[\frac{cm^3}{s} \right]$$

el cual multiplicado por la densidad del fluido correspondiente a una temperatura dada nos da el gasto másico, que es el que utilizaremos para los cálculos.

$$\dot{m} = \rho Q \left[\frac{g}{s} \right]$$

En las tablas presentadas a continuación se presenta para cada sustancia a diferentes temperaturas y diferentes aberturas de la válvula que controla el flujo que pasa a la tubería del segundo depósito, su correspondiente caída de presión y su gasto másico.

Se presenta una sola tabla para cada sustancia a determinada temperatura, - porque los valores que se encuentran dentro de la misma, son valores promedio, ya que se hicieron varias corridas para la misma situación. Esto se hace con el objetivo de trabajar con valores representativos.

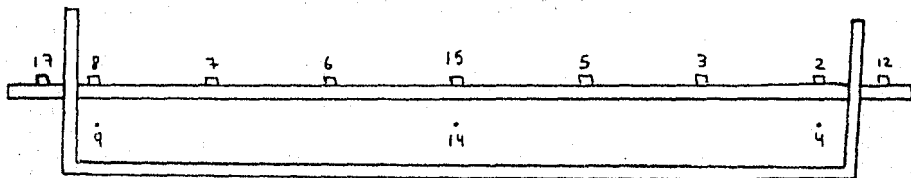
Para obtener el gasto másico, es necesario la densidad, esta propiedad se obtuvo para cada corrida con la temperatura a la salida de la sección en estudio, ya que se tiene el gasto volumétrico a la salida y suponemos que el gasto másico es el mismo. Aunque se sabe que como la sustancia se va calentando a través de la sección en estudio, nunca se tiene una misma temperatura y por lo tanto su densidad - también va cambiando.

Debe hacerse notar que debido a la alta viscosidad de la solución de Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada, el gasto que se tenía con el depósito 2 en la misma posición que se utilizó la glicerina era tan pequeño, que fue necesario subir el depósito 2 hasta su mayor altura posible para lograr gasto similares a los de la glicerina.

Junto a cada tabla de caída de presión y gasto másico se encuentra una tabla de temperaturas, con los datos que se leyeron en los termopares.

El termopar 12 se encuentra antes de entrar a la sección de estudio y nos da la temperatura con la que entra el fluido a la misma, después tenemos los termopares 2, 3, 5, 15, 6, 7 y 8 que se encuentran dentro de la sección y nos muestran como es el cambio de temperaturas y posteriormente tenemos el termopar 17 que se encuentra a la salida de la sección de estudio. Se cuenta además con tres termopares: 4, 14 y 9 que sirven para obtener la temperatura del agua, la cual suponemos que es la misma que la de la pared de la tubería.

Localización de los termopares.



Glicerina

T = 18.5°C

| altura | $\Delta P/L$ | \dot{m}_E | LOLA |
|--------|--------------|-------------|------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2/6 | 37.54 | 2.9287 | 1 |
| 3/6 | 64.88 | 5.5048 | 2 |
| 4/6 | 79.68 | 6.7596 | 3 |
| 5/6 | 86.196 | 7.4428 | 4 |
| 1 | 88.46 | 7.848 | 5 |
| 1 1/6 | 88.96 | 8.1184 | 6 |
| 1 2/6 | 89.21 | 8.1196 | 7 |
| 1 3/6 | 89.71 | 8.1672 | 8 |

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 19.4 | 18.2 | 19.2 | 19 | 19.4 | 19.4 | 18.4 | 18.8 | 19.1 |
| 2 | 18.7 | 18.6 | 19.2 | 19.1 | 19.3 | 19.4 | 18.1 | 19.3 | 19.2 |
| 3 | 18.4 | 18.6 | 19 | 18.9 | 19.1 | 19.1 | 17.9 | 19 | 19 |
| 5 | 18.2 | 18.5 | 18.9 | 18.8 | 18.9 | 19 | 17.9 | 18.8 | 18.9 |
| 15 | 17.7 | 18.1 | 18.5 | 18.4 | 18.5 | 18.6 | 17.3 | 18.3 | 18.4 |
| 6 | 18.2 | 18.5 | 18.8 | 18.7 | 18.8 | 18.9 | 17.9 | 18.7 | 18.8 |
| 7 | 18 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18 | 18.2 | 18.5 |
| 8 | 18 | 18.5 | 18.6 | 18.5 | 18.6 | 18.6 | 17.8 | 18.4 | 18.5 |
| 17 | 17.9 | 18 | 18.5 | 18.4 | 18.6 | 18.7 | 17.9 | 18.6 | 18.5 |
| 4 | 18.2 | 18.6 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18 | 18.6 | 18.7 |
| 14 | 17.7 | 18 | 18.5 | 18.3 | 18.5 | 18.5 | 17.4 | 18.2 | 18.4 |
| 9 | 17.8 | 18.4 | 18.3 | 18.3 | 18.3 | 18.3 | 17.8 | 17.9 | 18.3 |

T = 24°C

| altura | $\Delta P/L$ | \dot{m}_E | LOLA |
|--------|--------------|-------------|------|
| 0 | 0 | 0 | 10 |
| 2/6 | 31.53 | 3.4411 | 11 |
| 3/6 | 55.85 | 5.0402 | 12 |
| 4/6 | 68.89 | 7.902 | 13 |
| 5/6 | 74.66 | 7.9585 | 14 |
| 1 | 79.43 | 8.4619 | 15 |
| 1 1/6 | 84.69 | 8.6903 | 16 |
| 1 2/6 | 85.95 | 8.9751 | 17 |
| 1 3/6 | 86.95 | 9.0311 | 18 |

| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 20.9 | 21.2 | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 |
| 2 | 23.2 | 23.4 | 23 | 23 | 23.1 | 22.9 | 23 | 22.9 | 22.9 |
| 3 | 23.4 | 23.7 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.4 | 23.5 | 23.4 | 23.4 |
| 5 | 23.5 | 23.7 | 23.5 | 23.5 | 23.6 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 |
| 15 | 23.1 | 23.2 | 23.1 | 23.1 | 23.1 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 6 | 23.5 | 23.7 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 |
| 7 | 23.6 | 23.7 | 23.6 | 23.6 | 23.6 | 23.6 | 23.5 | 23.5 | 23.5 |
| 8 | 23.1 | 23.5 | 23.5 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.3 | 23.3 |
| 17 | 21.1 | 22.6 | 22.1 | 22.1 | 22.1 | 21.9 | 21.8 | 21.8 | 21.8 |
| 4 | 23.7 | 23.8 | 23.7 | 23.7 | 23.7 | 23.7 | 23.7 | 23.7 | 23.7 |
| 14 | 23.1 | 23.2 | 23.2 | 23.1 | 23.1 | 23.1 | 23.1 | 23.1 | 23.1 |
| 9 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 |

$$\left[\frac{\Delta P}{L} \right] = \left[\frac{\text{dina}}{\text{cm}} \right]$$

$$\left[\dot{m}_E \right] = \left[\frac{\text{g}}{\text{s}} \right]$$

Glicerina

T = 30°C

| altura | $\Delta P/L$ | m_E | LOLA | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|--------|--------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 20 | 24.6 | 23.9 | 22.2 | 21.4 | 20.5 | 20.7 | 20.8 | 22.1 | 22.4 |
| 2/8 | 28.51 | 4.2771 | 21 | 29.7 | 29.2 | 28.1 | 27.4 | 27.8 | 28 | 27.9 | 27.7 | 27.8 |
| 3/8 | 48.33 | 7.2333 | 22 | 30.3 | 30.2 | 29.5 | 29.8 | 30.2 | 30.2 | 30.2 | 29.6 | 29.5 |
| 4/8 | 60.87 | 9.1948 | 23 | 5 | 30.2 | 30.2 | 29.8 | 30 | 30.5 | 30.5 | 30.4 | 29.8 |
| 5/8 | 66.64 | 9.4432 | 24 | 15 | 29.7 | 29.7 | 29.3 | 29.8 | 30.4 | 30.3 | 30.3 | 29.6 |
| 1 | 67.14 | 10.2184 | 25 | 6 | 30.2 | 30.1 | 29.9 | 30.4 | 31.1 | 31 | 30.9 | 30.2 |
| 1 1/8 | 70.9 | 10.516 | 26 | 7 | 30.1 | 30.2 | 30 | 30.8 | 31.6 | 31.5 | 31.4 | 30.5 |
| 1 2/8 | 72.40 | 10.6962 | 27 | 8 | 29.9 | 29.9 | 29.8 | 30.4 | 31.2 | 31.1 | 31 | 30.1 |
| 1 3/8 | 74.41 | 11.4946 | 28 | 17 | 27.8 | 27 | 27 | 27 | 27.2 | 27.1 | 27.1 | 26.7 |
| | | | | 4 | 30.3 | 30.3 | 30.2 | 31.1 | 31.8 | 31.7 | 31.7 | 30.9 |
| | | | | 14 | 29.8 | 29.7 | 29.5 | 30.1 | 30.7 | 30.7 | 30.6 | 29.8 |
| | | | | 9 | 29.8 | 29.7 | 29.7 | 30.5 | 31.4 | 31.3 | 31.2 | 30.2 |

T = 35°C

| altura | $\Delta P/L$ | m_E | LOLA | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
|--------|--------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 20 | 27 | 26 | 23.8 | 23.6 | 23.7 | 23.8 | 24 | 24.3 | 24.4 |
| 2/6 | 26.76 | 4.8403 | 31 | 2 | 35.1 | 33.4 | 31.6 | 31.5 | 31.4 | 31.2 | 31.4 | 31.3 |
| 3/6 | 41.81 | 7.4404 | 32 | 3 | 35.7 | 35.2 | 34 | 34 | 33.8 | 33.7 | 33.5 | 33.6 |
| 4/6 | 50.83 | 9.1991 | 33 | 5 | 35.6 | 35.1 | 34.3 | 34.2 | 34.1 | 34 | 33.8 | 33.8 |
| 5/6 | 55.59 | 10.0726 | 34 | 15 | 3.5 | 34.8 | 34.1 | 33.9 | 33.8 | 33.7 | 33.6 | 33.5 |
| 1 | 58.11 | 10.6612 | 35 | 6 | 35.5 | 35.3 | 34.8 | 34.6 | 34.5 | 33.4 | 34.4 | 34.3 |
| 1 1/6 | 60.37 | 11.016 | 36 | 7 | 35.3 | 35.1 | 35.1 | 35 | 34.9 | 34.8 | 34.8 | 34.7 |
| 1 2/6 | 60.87 | 11.4792 | 37 | 8 | 35 | 34.9 | 34.6 | 34.4 | 34.3 | 34.3 | 34.2 | 34.1 |
| 1 3/6 | 61.37 | 11.5818 | 38 | 17 | 31.3 | 33.9 | 31.3 | 30.8 | 30.5 | 30.4 | 30.3 | 30.2 |
| | | | | 4 | 35.8 | 35.6 | 35.2 | 35.2 | 35.4 | 35.3 | 35.3 | 35.1 |
| | | | | 14 | 35 | 34.9 | 34.4 | 34.2 | 34.1 | 34.1 | 34 | 33.9 |
| | | | | 9 | 34.8 | 34.7 | 34.6 | 34.5 | 34.4 | 34.3 | 34.3 | 34.2 |

$$[\Delta P/L] = [\text{dina/cm}]$$

$$[m_E] = [\%]$$

Glicerina

T = 40°C

| altura | AP/L | mE | LOLA |
|--------|-------|---------|------|
| 0 | 0 | 0 | 40 |
| 2/6 | 21.74 | 4.7703 | 41 |
| 2/6 | 41.05 | 8.7234 | 42 |
| 4/6 | 50.33 | 10.3178 | 43 |
| 5/6 | 56.35 | 12.2308 | 44 |
| 1 | 58.86 | 12.7312 | 45 |
| 1 1/6 | 60.62 | 12.9546 | 46 |
| 1 2/6 | 61.87 | 13.0557 | 47 |
| 1 3/6 | 62.12 | 13.4245 | 48 |

| | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 32.7 | 29.4 | 25.2 | 25 | 25.3 | 25.6 | 26.3 | 26.6 | 26.9 |
| 8 | 40.4 | 40.4 | 35.6 | 35.4 | 35.6 | 35.5 | 35.6 | 35.2 | 35.5 |
| 3 | 40.8 | 40.3 | 38.3 | 38.6 | 38.2 | 38.3 | 38.1 | 38 | 38.1 |
| 5 | 40.7 | 40.4 | 39.3 | 39.2 | 39.1 | 38.9 | 38.8 | 38.7 | 38.7 |
| 15 | 40.3 | 40.1 | 39.2 | 39 | 38.9 | 38.8 | 38.5 | 38.5 | 38.5 |
| 6 | 40.6 | 40.6 | 39.9 | 39.7 | 39.6 | 39.5 | 39.3 | 39.2 | 39.1 |
| 7 | 40.6 | 40.5 | 40.4 | 40.3 | 40.1 | 40 | 39.8 | 39.7 | 39.6 |
| 8 | 40.1 | 40.3 | 40 | 39.8 | 39.6 | 39.5 | 39.3 | 39.2 | 39.1 |
| 17 | 35.8 | 39.2 | 33.7 | 33.1 | 32.8 | 32.7 | 32.7 | 32.8 | 32.9 |
| 4 | 40.9 | 40.8 | 40.7 | 40.6 | 40.5 | 40.4 | 40.2 | 40 | 39.9 |
| 14 | 40.3 | 40.4 | 39.6 | 39.4 | 39.3 | 39.1 | 39 | 38.8 | 38.8 |
| 9 | 40.2 | 40.1 | 40 | 39.9 | 39.8 | 39.6 | 39.3 | 39.3 | 39.2 |

T = 45°C

| altura | AP/L | mE | LOLA |
|--------|-------|---------|------|
| 0 | 0 | 0 | 50 |
| 2/6 | 19.75 | 5.477 | 51 |
| 3/6 | 34.03 | 9.066 | 52 |
| 4/6 | 43.31 | 11.5402 | 53 |
| 5/6 | 48.33 | 13.2326 | 54 |
| 1 | 51.09 | 13.7945 | 55 |
| 1 1/6 | 51.59 | 14.2359 | 56 |
| 1 2/6 | 52.09 | 14.4165 | 57 |
| 1 3/6 | 53.59 | 14.8109 | 58 |

| | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 31.1 | 29.9 | 28.1 | 28.1 | 28.2 | 28.5 | 29.1 | 29.4 | 29.5 |
| 2 | 42.8 | 41.3 | 39.3 | 39 | 38.8 | 38.6 | 37.8 | 39 | 38.6 |
| 3 | 45.1 | 44.3 | 42.7 | 42.5 | 42.3 | 42 | 41 | 42.1 | 41.6 |
| 5 | 45.1 | 44.4 | 44.3 | 43 | 42.9 | 42.6 | 42.5 | 42.6 | 42.4 |
| 15 | 44.7 | 44.3 | 43.4 | 43.1 | 42.9 | 42.8 | 42.7 | 42.6 | 42.5 |
| 6 | 45.1 | 45 | 44.2 | 44 | 43.8 | 43.7 | 43.5 | 43.4 | 43.3 |
| 7 | 45.2 | 45 | 44.9 | 44.8 | 44.6 | 44.5 | 44.3 | 44.2 | 44.1 |
| 8 | 44.9 | 44.9 | 44.5 | 44.2 | 44 | 43.8 | 43.7 | 43.5 | 43.1 |
| 17 | 40.5 | 43.4 | 39.4 | 38.4 | 37.9 | 37.9 | 38.1 | 38.2 | 38.1 |
| 4 | 45.5 | 45.4 | 45.2 | 45.1 | 44.9 | 44.8 | 44.6 | 44.5 | 44.4 |
| 14 | 44.8 | 44.8 | 44 | 43.6 | 43.5 | 43.3 | 43.2 | 43.1 | 43 |
| 9 | 44.9 | 44.7 | 44.6 | 44.5 | 44.3 | 44.2 | 44 | 43.9 | 43.8 |

$$\left[\frac{AP}{L} \right] = \left[\frac{\text{dina}}{\text{cm}} \right]$$

$$\left[mE \right] = \left[\frac{g}{\text{cm}^3} \right]$$

Glicerina

T = 50°C

| altura | $\Delta P/L$ | mE | LOLA | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | |
|--------|--------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 60 | 12 | 37.9 | 34.4 | 27.5 | 27.7 | 27.9 | 28.2 | 28.6 | 29.2 | 29.5 |
| 2/6 | 17.98 | 5.5154 | 61 | 2 | 49.2 | 46.9 | 42.3 | 41.9 | 41.8 | 41.9 | 41.6 | 42.6 | 41.9 |
| 3/6 | 32.02 | 9.6156 | 62 | 3 | 49.9 | 49.5 | 46.7 | 46.1 | 45.6 | 45.8 | 45.7 | 45.5 | 45.5 |
| 4/6 | 44.31 | 12.945 | 63 | 5 | 49.9 | 49.5 | 47.6 | 47.4 | 47.1 | 47 | 46.8 | 46.6 | 46.4 |
| 5/6 | 50.83 | 14.9587 | 64 | 15 | 49.4 | 49.3 | 47.6 | 47.3 | 47.2 | 47 | 46.8 | 46.6 | 46.5 |
| 1 | 55.1 | 16.0907 | 65 | 6 | 49.8 | 49.7 | 48.4 | 48.2 | 48 | 47.8 | 47.6 | 47.4 | 47.3 |
| 1 1/6 | 57.36 | 16.9396 | 66 | 7 | 49.7 | 49.5 | 49.2 | 49 | 48.9 | 48.7 | 48.5 | 48.4 | 48.2 |
| 1 2/6 | 59.61 | 18.1276 | 67 | 8 | 49.3 | 49.3 | 48.7 | 48.4 | 48.2 | 48 | 47.8 | 47.7 | 47.5 |
| 1 3/6 | 61.62 | 18.4261 | 68 | 17 | 42.6 | 47.7 | 39.7 | 38.3 | 38.1 | 38.2 | 36 | 35.9 | 36.1 |
| | | | | 4 | 50 | 49.9 | 49.5 | 49.4 | 49.2 | 40 | 48.9 | 48.7 | 48.6 |
| | | | | 14 | 49.4 | 49.3 | 48.1 | 47.9 | 47.7 | 47.5 | 47.3 | 47.1 | 47.1 |
| | | | | 9 | 49.3 | 49.2 | 48.8 | 48.7 | 48.5 | 48.3 | 48.2 | 48 | 47.8 |

T = 55°C

| altura | $\Delta P/L$ | mE | LOLA | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | |
|--------|--------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 70 | 12 | 40.7 | 35.5 | 34.1 | 34.2 | 34.6 | 35.1 | 35.5 | 35.7 | 36 |
| 2/6 | 19.98 | 7.1363 | 71 | 2 | 54.2 | 49.3 | 47.7 | 46.9 | 46.8 | 46.7 | 46.7 | 46.8 | 47.1 |
| 3/6 | 38.04 | 13.1905 | 72 | 3 | 55.2 | 52.5 | 51.5 | 50.8 | 50.8 | 50.5 | 50.2 | 50.4 | 50.9 |
| 4/6 | 46.82 | 17.4361 | 73 | 5 | 55 | 53 | 52.3 | 51.8 | 51.6 | 51.4 | 51.3 | 51.2 | 51.7 |
| 5/6 | 54.09 | 19.7721 | 74 | 15 | 54.6 | 53 | 52.4 | 52.1 | 51.9 | 51.6 | 51.4 | 51.4 | 52 |
| 1 | 58.36 | 20.8456 | 75 | 6 | 54.9 | 53.9 | 53.4 | 53.1 | 52.2 | 52.6 | 52.4 | 52.3 | 52.9 |
| 1 1/6 | 56.61 | 21.5337 | 76 | 7 | 54.8 | 54.5 | 54.3 | 54.1 | 53.9 | 53.7 | 53.5 | 53.5 | 54.2 |
| 1 2/6 | 60.12 | 22.737 | 77 | 8 | 54.8 | 54.2 | 53.6 | 53.3 | 53.1 | 52.9 | 52.7 | 52.5 | 52.9 |
| 1 3/6 | 60.46 | 22.7745 | 78 | 17 | 48 | 48.8 | 46.8 | 45.7 | 45.6 | 45.3 | 45.2 | 45.3 | 45.9 |
| | | | | 4 | 55.2 | 54.9 | 54.7 | 54.5 | 54.3 | 54 | 53.9 | 53.9 | 54.7 |
| | | | | 14 | 54.6 | 53.8 | 53.1 | 52.7 | 52.5 | 52.3 | 52.1 | 52.1 | 52.7 |
| | | | | 9 | 54.4 | 54.2 | 54 | 53.8 | 53.6 | 53.5 | 53.2 | 53.1 | 53.8 |

$$[\Delta P/L] = [\text{dina/cm}]$$

$$[mE] = [g/\Delta]$$

Glicerina con fibras de carbón y grafito

T = 18°C

| altura | $\Delta P/L$ | mE | LOLA | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
|--------|--------------|--------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 17.8 | 18.5 | 18.7 | 18.7 | 18.8 | 18.8 | 18.9 | 19 | 19 |
| 2/6 | 17.23 | 2.3668 | 1 | 2 | 18.1 | 18.6 | 18.6 | 18.7 | 18.8 | 18.8 | 18.9 | 18.9 | 18.9 |
| 3/6 | 53.34 | 5.5206 | 2 | 3 | 18.1 | 18.4 | 18.4 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.6 | 18.6 | 18.6 |
| 4/6 | 69.39 | 7.9928 | 3 | 5 | 18 | 18.3 | 18.3 | 18.4 | 18.4 | 18.4 | 18.5 | 18.5 | 18.5 |
| 5/6 | 76.17 | 9.0238 | 4 | 15 | 17.6 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 18 | 18 | 18 | 18.1 |
| 1 | 77.66 | 9.026 | 5 | 6 | 18 | 18.2 | 18 | 18.2 | 18.3 | 18.3 | 18.3 | 18.4 | 18.4 |
| 1 1/6 | 77.92 | 9.1779 | 6 | 7 | 18 | 18.1 | 18.1 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| 1 2/6 | 79.43 | 9.3309 | 7 | 8 | 18.1 | 18.1 | 17.9 | 18.1 | 18.2 | 18.2 | 18.2 | 18.2 | 18.2 |
| 1 3/6 | 79.93 | 9.4052 | 8 | 17 | 17.7 | 18 | 17.9 | 18 | 18 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 |
| | | | | 4 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.2 |
| | | | | 14 | 17.6 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 18 |
| | | | | 9 | 18 | 18 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 17.9 |

T = 23.5°C

| altura | $\Delta P/L$ | mE | LOLA | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
|--------|--------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 10 | 12 | 21.8 | 21.8 | 21 | 20.6 | 20.5 | 20.5 | 20.6 | 20.7 | 20.7 |
| 2/6 | 21.99 | 3.3589 | 11 | 2 | 23.6 | 23.4 | 23 | 22.7 | 22.6 | 22.6 | 22.8 | 22.7 | 22.7 |
| 3/6 | 40.55 | 6.3752 | 12 | 3 | 23.7 | 23.7 | 23.5 | 23.4 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 |
| 4/6 | 62.87 | 8.8339 | 13 | 5 | 23.7 | 23.6 | 23.5 | 23.4 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 |
| 5/6 | 68.64 | 9.7846 | 14 | 15 | 23.3 | 23.3 | 23.1 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23.1 |
| 1 | 70.39 | 9.9723 | 15 | 6 | 23.8 | 23.6 | 23.5 | 23.5 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 |
| 1 1/6 | 71.4 | 10.1755 | 16 | 7 | 23.6 | 23.6 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 |
| 1 2/6 | 72.4 | 10.2871 | 17 | 8 | 23.2 | 23.4 | 23.4 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.2 | 23.2 | 23.2 |
| 1 3/6 | 73.41 | 10.5131 | 18 | 17 | 21.4 | 22.9 | 22.6 | 22.5 | 22.4 | 22.4 | 22.4 | 22.4 | 22.4 |
| | | | | 4 | 23.8 | 23.8 | 23.8 | 23.8 | 23.7 | 23.7 | 23.7 | 23.7 | 23.7 |
| | | | | 14 | 23.3 | 23.3 | 23.2 | 23.2 | 23.1 | 23.1 | 23.1 | 23.1 | 23.1 |
| | | | | 9 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.2 | 23.2 | 23.2 |

$$\left[\frac{\Delta P}{L} \right] = \left[\frac{\text{dina}}{\text{cm}} \right]$$

$$\left[mE \right] = \left[\frac{g}{n} \right]$$

Glicerina con fibras de carbón y grafito

T = 30°C

| altura | $\Delta P/L$ | m m | LOLA | | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|--------|--------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 20 | 12 | 25.4 | 24 | 21.5 | 20.9 | 20.7 | 20.9 | 21.2 | 21.5 | 21.6 |
| 2/6 | 24.25 | 5.1547 | 21 | 2 | 30.7 | 29.4 | 27.8 | 27.1 | 26.6 | 26.9 | 26.9 | 27 | 27.1 |
| 3/6 | 43.06 | 8.3424 | 22 | 3 | 31.1 | 30.9 | 29.9 | 29.5 | 29.2 | 29.2 | 29.1 | 29.2 | 29.2 |
| 4/6 | 52.84 | 9.7186 | 23 | 5 | 31.1 | 30.8 | 30 | 29.7 | 29.6 | 29.5 | 29.5 | 29.5 | 29.4 |
| 5/6 | 60.87 | 11.1803 | 24 | 15 | 30.7 | 30.6 | 29.9 | 29.7 | 29.6 | 29.5 | 29.4 | 29.5 | 29.4 |
| 1 | 62.37 | 11.7304 | 25 | 6 | 31.1 | 31 | 30.5 | 30.3 | 30.1 | 30.1 | 30 | 30 | 30 |
| 1 1/6 | 63.12 | 12.2396 | 26 | 7 | 31 | 30.9 | 30.9 | 30.8 | 30.8 | 30.7 | 30.6 | 30.5 | 30.5 |
| 1 2/6 | 64.88 | 12.3616 | 27 | 8 | 30.8 | 30.8 | 30.6 | 30.4 | 30.3 | 30.2 | 30.1 | 30.1 | 30.1 |
| 1 3/6 | 65.38 | 12.483 | 28 | 17 | 27 | 29.7 | 28.6 | 28.2 | 28.1 | 28 | 28.1 | 28.1 | 28.1 |
| | | | | 4 | 31.2 | 31.1 | 31.1 | 31 | 31 | 30.9 | 30.8 | 30.7 | 30.7 |
| | | | | 14 | 30.7 | 30.7 | 30.3 | 30.1 | 29.9 | 29.8 | 29.8 | 29.7 | 29.7 |
| | | | | 9 | 30.7 | 30.7 | 30.6 | 30.6 | 30.5 | 30.4 | 30.4 | 30.3 | 30.3 |

T = 35°C

| altura | $\Delta P/L$ | m m | LOLA | | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
|--------|--------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 30 | 12 | 28.6 | 27.3 | 27.1 | 23.4 | 23.8 | 24.1 | 24.3 | 24.6 | 24.7 |
| 2/6 | 14.97 | 4.1922 | 31 | 2 | 30.2 | 34.5 | 31.2 | 31.1 | 30.6 | 31 | 30.7 | 30.9 | 30.9 |
| 3/6 | 33.03 | 7.8683 | 32 | 3 | 36.8 | 36.2 | 34.2 | 34 | 33.6 | 33.7 | 33.4 | 33.6 | 33.5 |
| 4/6 | 51.08 | 11.9009 | 33 | 5 | 36.7 | 36.1 | 34.6 | 34.5 | 34.2 | 34.2 | 34 | 34 | 34 |
| 5/6 | 56.85 | 13.374 | 34 | 15 | 36.4 | 35.9 | 34.7 | 34.6 | 34.4 | 34.3 | 34.2 | 34.2 | 34.2 |
| 1 | 57.36 | 13.6781 | 35 | 6 | 36.7 | 36.2 | 35.3 | 35.1 | 35 | 34.9 | 34.8 | 34.7 | 34.7 |
| 1 1/6 | 58.61 | 13.8484 | 36 | 7 | 36.6 | 36.1 | 36 | 35.8 | 35.7 | 35.6 | 35.5 | 35.4 | 35.4 |
| 1 2/6 | 60.62 | 14.379 | 37 | 8 | 36.5 | 36 | 35.5 | 35.3 | 35.1 | 35.1 | 35 | 34.9 | 34.9 |
| 1 3/6 | 63.37 | 15.23 | 38 | 17 | 32.7 | 34.4 | 32.6 | 32.5 | 32.4 | 32.6 | 32.7 | 32.2 | 32.4 |
| | | | | 4 | 36.8 | 36.3 | 36.2 | 36 | 35.9 | 35.8 | 35.8 | 35.7 | 35.6 |
| | | | | 14 | 36.4 | 36 | 35.1 | 35 | 34.8 | 34.7 | 34.6 | 34.6 | 34.5 |
| | | | | 9 | 36.4 | 35.9 | 35.8 | 35.6 | 35.5 | 35.4 | 35.3 | 35.2 | 35.2 |

$$[\Delta P/L] = [\text{dina/cm}]$$

$$[m m] = [g/s]$$

Glicerina con fibras de carbón y grafito

T = 40°C

| altura | $\Delta\rho/L$ | m e | LOLA | | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
|--------|----------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 40 | 12 | 31.6 | 27 | 25.5 | 25.5 | 25.8 | 26.2 | 26.5 | 26.8 | 27.1 |
| 2/6 | 11.71 | 5.4031 | 41 | 2 | 39.9 | 36.1 | 35 | 34 | 33.9 | 33.9 | 34.3 | 34 | 34.3 |
| 3/6 | 32.53 | 8.7156 | 42 | 3 | 40.6 | 38.9 | 38.4 | 37.5 | 37.3 | 37.2 | 37.4 | 37.1 | 37.1 |
| 4/6 | 47.32 | 13.2118 | 43 | 5 | 40.5 | 39.2 | 38.8 | 38.2 | 38 | 37.9 | 38 | 39.7 | 37.7 |
| 5/6 | 53.34 | 15.0236 | 44 | 15 | 39.9 | 40.1 | 39.2 | 38.9 | 38.4 | 38.3 | 38.1 | 38.1 | 37.9 |
| 1 | 55.85 | 15.2553 | 45 | 6 | 40.4 | 39.8 | 39.5 | 39 | 38.9 | 38.7 | 38.7 | 38.5 | 38.4 |
| 1 1/6 | 62.87 | 16.9358 | 46 | 7 | 40.3 | 40.1 | 40.1 | 39.9 | 39.8 | 39.6 | 39.5 | 39.4 | 39.2 |
| 1 2/6 | 63.37 | 17.3278 | 47 | 8 | 40.1 | 40 | 39.7 | 39.3 | 39.2 | 39 | 38.9 | 38.8 | 38.7 |
| 1 3/6 | 65.13 | 18.0872 | 48 | 17 | 35.8 | 38 | 36.6 | 35.4 | 35.7 | 35.3 | 35.5 | 35.4 | 35.4 |
| | | | | 4 | 40.6 | 40.4 | 40.3 | 40.2 | 40 | 39.9 | 39.8 | 39.6 | 39.5 |
| | | | | 14 | 40.2 | 39.8 | 39.4 | 38.9 | 38.8 | 38.6 | 38.6 | 38.4 | 38.3 |
| | | | | 9 | 40.1 | 39.9 | 39.8 | 39.7 | 39.6 | 39.4 | 39.3 | 39.2 | 39 |

T = 44°C

| altura | $\Delta\rho/L$ | m e | LOLA | | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 |
|--------|----------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 50 | 12 | 28.6 | 28.5 | 27.4 | 27.4 | 27.9 | 28.2 | 28.5 | 28.8 | 29.3 |
| 2/6 | 16.47 | 5.7468 | 51 | 2 | 40.7 | 39.8 | 37.9 | 37.6 | 37.6 | 37.5 | 37.8 | 38.5 | 39.3 |
| 3/6 | 42.31 | 11.0739 | 52 | 3 | 43.2 | 43.6 | 42.1 | 41.5 | 41.6 | 41.4 | 41.9 | 42.5 | 43 |
| 4/6 | 51.84 | 13.5375 | 53 | 5 | 43.8 | 43.8 | 42.8 | 42.4 | 42.1 | 42 | 42.5 | 43.1 | 43.2 |
| 5/6 | 57.61 | 15.1313 | 54 | 15 | 43.9 | 43.9 | 43.1 | 42.8 | 42.7 | 42.6 | 43.1 | 43.7 | 44.1 |
| 1 | 59.61 | 16.532 | 55 | 6 | 44.3 | 44.5 | 43.9 | 43.6 | 43.3 | 43.2 | 43.7 | 44 | 44.7 |
| 1 1/6 | 60.36 | 17.6609 | 56 | 7 | 45.1 | 44.9 | 44.8 | 44.6 | 44.4 | 44.4 | 45 | 45.8 | 46 |
| 1 2/6 | 60.87 | 17.867 | 57 | 8 | 44.4 | 44.7 | 44.3 | 44 | 43.7 | 43.6 | 43.9 | 44.5 | 45.1 |
| 1 3/6 | 66.38 | 18.4312 | 58 | 17 | 38.8 | 42.7 | 39.9 | 39.3 | 39.2 | 39.1 | 39.7 | 40.1 | 40.3 |
| | | | | 4 | 45.3 | 45.1 | 45 | 44.8 | 44.6 | 44.8 | 45.4 | 46 | 46.2 |
| | | | | 14 | 44.1 | 44.4 | 43.7 | 43.4 | 43.2 | 43.1 | 44.6 | 44.3 | 44.6 |
| | | | | 9 | 44.9 | 44.7 | 44.6 | 44.5 | 44.2 | 44.2 | 44.8 | 45.6 | 45.8 |

$$[\Delta\rho/L] = [\text{dina/cm}]$$

$$[m e] = [g/s]$$

Glicerina con fibras de carbón y grafito

T = 50°C

| alunT _{una} | ΔP/L | m _E | LOLA | | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 |
|----------------------|-------|----------------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 60 | 12 | 33.1 | 32.2 | 32 | 33.3 | 33.5 | 33.7 | 33.9 | 34 | 34.4 |
| 2/6 | 23.99 | 9.7482 | 61 | 2 | 45 | 43.1 | 42.6 | 41.8 | 42.4 | 42.5 | 42.9 | 43 | 42.9 |
| 3/6 | 40.8 | 14.2033 | 62 | 3 | 47.6 | 47.1 | 46.6 | 45.4 | 45.7 | 45.9 | 46.5 | 46.6 | 46.2 |
| 4/6 | 56.85 | 18.1546 | 63 | 5 | 48.4 | 47.6 | 47.2 | 46.2 | 46.9 | 47.3 | 47.6 | 47.6 | 47.3 |
| 5/6 | 60.87 | 22.8816 | 64 | 15 | 48.4 | 47.8 | 47.5 | 46.5 | 47.2 | 47.8 | 48 | 47.9 | 47.7 |
| 1 | 62.87 | 23.7552 | 65 | 6 | 48.8 | 48.4 | 48.1 | 47.3 | 47.9 | 48.6 | 48.8 | 48.7 | 48.4 |
| 1 1/6 | 63.12 | 23.9814 | 66 | 7 | 49.4 | 49.2 | 49.1 | 48.5 | 49.3 | 50 | 50.1 | 49.9 | 49.5 |
| 1 2/6 | 63.65 | 23.9873 | 67 | 8 | 48.9 | 48.7 | 48.5 | 47.5 | 48.1 | 48.7 | 49.1 | 49.1 | 48.8 |
| 1 3/6 | 66.63 | 24.8256 | 68 | 17 | 42.4 | 44 | 44 | 43.2 | 43.6 | 44.2 | 44.3 | 44.1 | 42 |
| | | | | 4 | 49.7 | 49.4 | 49.3 | 48.9 | 49.6 | 50.2 | 50.3 | 50.1 | 49.7 |
| | | | | 14 | 48.2 | 48.6 | 48.2 | 48 | 47.2 | 47.8 | 48.5 | 48.7 | 48.5 |
| | | | | 9 | 49.2 | 49 | 48.9 | 48.2 | 49 | 49.8 | 49.9 | 49.7 | 49.3 |

T = 55°C

| alunT _{una} | ΔP/L | m _E | LOLA | | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 |
|----------------------|-------|----------------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 70 | 12 | 33.7 | 32.8 | 33.7 | 33.8 | 34 | 34.3 | 34.6 | 35 | 35.4 |
| 2/6 | 24.75 | 11.4309 | 71 | 2 | 51.3 | 45.8 | 46 | 45.9 | 45.9 | 46.1 | 45.8 | 46 | 45.9 |
| 3/6 | 43.06 | 19.746 | 72 | 3 | 54.5 | 50.3 | 50.7 | 50.7 | 50.7 | 50.5 | 50.3 | 50.3 | 50.1 |
| 4/6 | 51.84 | 23.5941 | 73 | 5 | 55 | 51.7 | 52 | 52.1 | 52.2 | 52 | 51.7 | 51.6 | 51.3 |
| 5/6 | 57.35 | 25.8321 | 74 | 15 | 54.7 | 52.1 | 52.5 | 52.7 | 52.8 | 52.6 | 52.4 | 52.2 | 51.9 |
| 1 | 60.12 | 27.529 | 75 | 6 | 55 | 53 | 53.2 | 53.6 | 53.6 | 53.6 | 53.3 | 53 | 52.7 |
| 1 1/6 | 62.12 | 27.8784 | 76 | 7 | 54.9 | 54.3 | 54.8 | 55.3 | 55.2 | 55 | 54.8 | 54.5 | 54.2 |
| 1 2/6 | 66.13 | 28.5401 | 77 | 8 | 54.8 | 54.3 | 53.4 | 53.8 | 54 | 54 | 53.8 | 53.6 | 53.3 |
| 1 3/6 | 67.39 | 28.9097 | 78 | 17 | 49.2 | 47.1 | 47.6 | 47 | 47.1 | 47.5 | 47.2 | 47 | 46.9 |
| | | | | 4 | 55.1 | 54.3 | 55.1 | 55.5 | 55.5 | 55.2 | 55.1 | 54.7 | 54.4 |
| | | | | 14 | 54.8 | 52.8 | 53.1 | 53.5 | 53.6 | 53.3 | 53.2 | 52.9 | 52.6 |
| | | | | 9 | 54.7 | 54.1 | 54.5 | 55 | 55 | 54.8 | 54.6 | 54.3 | 54 |

$$[\Delta P/L] = [d_{una}/cm]$$

$$[m_E] = [g/\Delta]$$

Separán

T = 18°C

| altura | $\Delta p/L$ | mm | LOLA |
|--------|--------------|--------|------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2/6 | 110.75 | 3.3503 | 1 |
| 3/6 | 112.78 | 4.3037 | 2 |
| 4/6 | 113.53 | 5.3099 | 3 |
| 5/6 | 113.79 | 5.6735 | 4 |
| 1 | 114.04 | 5.8995 | 5 |
| 1 1/6 | 114.29 | 5.9399 | 6 |
| 1 2/6 | 114.54 | 6.0274 | 7 |
| 1 3/6 | 114.79 | 6.0872 | 8 |

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 17.5 | 18 | 17.9 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.9 |
| 2 | 17.7 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 |
| 3 | 17.6 | 17.8 | 18 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 18 | 18 |
| 5 | 17.6 | 17.7 | 17.9 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.9 | 17.9 |
| 15 | 17.1 | 17.3 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.5 |
| 6 | 17.5 | 17.6 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.8 |
| 7 | 17.5 | 17.5 | 17.5 | 17.5 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 17.6 |
| 8 | 17.5 | 17.5 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 17.6 |
| 17 | 17.1 | 17.3 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.5 | 17.5 |
| 4 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 17.7 | 17.7 | 17.7 | 17.7 | 17.7 | 17.7 |
| 14 | 17.1 | 17.2 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 |
| 9 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 17.4 |

T = 21°C

| altura | $\Delta p/L$ | mm | LOLA |
|--------|--------------|--------|------|
| 0 | 0 | 0 | 10 |
| 2/6 | 104.01 | 3.6442 | 11 |
| 3/6 | 108.02 | 4.5131 | 12 |
| 4/6 | 110.02 | 5.4258 | 13 |
| 5/6 | 110.28 | 5.8868 | 14 |
| 1 | 110.53 | 6.0737 | 15 |
| 1 1/6 | 110.78 | 6.1397 | 16 |
| 1 2/6 | 111.03 | 6.1539 | 17 |
| 1 3/6 | 111.53 | 6.3741 | 18 |

| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 19.9 | 19.5 | 19 | 19.2 | 19.4 | 19.6 | 19.7 | 19.8 | 19.9 |
| 2 | 21.3 | 20.9 | 20.6 | 20.7 | 20.7 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 |
| 3 | 21.4 | 21.2 | 21.1 | 21.1 | 21.1 | 21.2 | 21.2 | 21.2 | 21.2 |
| 5 | 21.3 | 21.2 | 21.1 | 21.1 | 21.1 | 21.2 | 21.2 | 21.1 | 21.2 |
| 15 | 20.9 | 20.8 | 20.8 | 20.7 | 20.8 | 20.8 | 20.8 | 20.8 | 20.8 |
| 6 | 21.3 | 21.2 | 21.1 | 21.1 | 21.1 | 21.1 | 21.2 | 21.1 | 21.2 |
| 7 | 21.2 | 21.2 | 21.2 | 21.2 | 21.2 | 21.1 | 21.2 | 21.2 | 21.2 |
| 8 | 21.1 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21.1 | 21 |
| 17 | 20.6 | 20.5 | 20.3 | 20.2 | 20.2 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.4 |
| 4 | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 21.4 |
| 14 | 21 | 20.9 | 20.8 | 20.8 | 20.9 | 20.8 | 20.8 | 20.8 | 20.8 |
| 9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 |

$$[\Delta p/L] = [\text{dina/cm}]$$

$$[\text{mm}] = [g/s]$$

Separán

T = 29°C

| altura | AP/L | mE | LOLA | | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|--------|--------|--------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 20 | 12 | 24.2 | 21.2 | 20.2 | 19.9 | 20 | 20.3 | 20.7 | 20.7 | 20.9 |
| 2/6 | 107.52 | 3.8453 | 21 | 2 | 29.3 | 26.7 | 25.8 | 25.5 | 25.5 | 25.5 | 25.4 | 25.8 | 25.7 |
| 3/6 | 110.27 | 4.7857 | 22 | 3 | 29.5 | 28.5 | 28 | 27.8 | 27.7 | 27.8 | 27.6 | 27.7 | 27.7 |
| 4/6 | 111.28 | 5.8074 | 23 | 5 | 29.4 | 28.8 | 28.5 | 28.3 | 28.3 | 28.2 | 28.2 | 28.1 | 28.1 |
| 5/6 | 111.78 | 6.286 | 24 | 15 | 29 | 28.6 | 28.3 | 28.2 | 28.1 | 28 | 28 | 27.9 | 27.9 |
| 1 | 112.03 | 6.459 | 25 | 6 | 29.4 | 29 | 28.8 | 28.6 | 28.6 | 28.4 | 28.4 | 28.4 | 28.4 |
| 1 1/6 | 112.53 | 6.6714 | 26 | 7 | 29.3 | 29.3 | 29.2 | 29.2 | 29.2 | 29 | 29 | 28.9 | 28.9 |
| 1 2/6 | 112.78 | 6.8146 | 27 | 8 | 29.1 | 29.1 | 28.9 | 28.8 | 28.8 | 28.5 | 28.5 | 28.5 | 28.5 |
| 1 3/6 | 113.04 | 6.9705 | 28 | 17 | 25.1 | 27.5 | 26.8 | 26.5 | 25.9 | 25.8 | 25.8 | 25.8 | 25.8 |
| | | | | 4 | 29.6 | 29.5 | 29.5 | 29.4 | 29.3 | 29.3 | 29.2 | 29.2 | 29.1 |
| | | | | 14 | 29.1 | 28.8 | 28.6 | 28.4 | 28.3 | 28.2 | 28.2 | 28.1 | 28.1 |
| | | | | 9 | 29.1 | 29 | 29 | 28.9 | 28.9 | 28.8 | 28.7 | 28.7 | 28.7 |

T = 34°C

| altura | AP/L | mE | LOLA | | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
|--------|--------|--------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 30 | 12 | 24.5 | 22.8 | 22.5 | 23 | 23.5 | 23.9 | 21.4 | 24.4 | 24.4 |
| 2/6 | 110.75 | 3.8503 | 31 | 2 | 32 | 29.7 | 29.6 | 29.6 | 29.6 | 29.6 | 31.2 | 29.8 | 29.8 |
| 3/6 | 111.03 | 5.0334 | 32 | 3 | 32.4 | 32.6 | 32.3 | 32.3 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.1 | 32 |
| 4/6 | 112.03 | 6.1412 | 33 | 5 | 33.9 | 33.1 | 32.9 | 32.8 | 32.7 | 32.7 | 32.7 | 32.6 | 32.6 |
| 5/6 | 112.53 | 6.6617 | 34 | 15 | 33.6 | 33 | 32.8 | 32.6 | 32.5 | 32.5 | 32.5 | 32.4 | 32.4 |
| 1 | 112.78 | 6.969 | 35 | 6 | 34 | 33.4 | 33.3 | 33.1 | 33 | 32.9 | 32.9 | 32.8 | 32.8 |
| 1 1/6 | 113.04 | 7.1409 | 36 | 7 | 34.3 | 33.9 | 33.8 | 33.7 | 33.7 | 33.6 | 33.5 | 33.4 | 33.6 |
| 1 2/6 | 113.28 | 7.2493 | 37 | 8 | 34.1 | 33.7 | 33.5 | 33.4 | 33.3 | 33.2 | 33.1 | 33 | 33 |
| 1 3/6 | 113.53 | 7.2604 | 38 | 17 | 30.8 | 31.4 | 30.8 | 30.2 | 30 | 30 | 30.1 | 30.1 | 30 |
| | | | | 4 | 33.4 | 34 | 34 | 33.9 | 33.8 | 33.8 | 33.7 | 33.6 | 33.9 |
| | | | | 14 | 33.7 | 33.2 | 33.1 | 32.9 | 32.8 | 32.7 | 32.7 | 32.6 | 32.7 |
| | | | | 9 | 34.2 | 33.1 | 33 | 32.6 | 33 | 33.1 | 33.2 | 33.1 | 33 |

$$[AP/L] = [dina/cm]$$

$$[mE] = [g/A]$$

Separación

T = 39°C

| distancia | AP/L | m _E | LOLA |
|-----------|--------|----------------|------|
| 0 | 0 | 0 | 40 |
| 2/6 | 108.77 | 4.3759 | 41 |
| 3/6 | 110.75 | 5.1995 | 42 |
| 4/6 | 112.03 | 6.5739 | 43 |
| 5/6 | 112.53 | 7.2472 | 44 |
| 1 | 112.78 | 7.6523 | 45 |
| 1 1/6 | 113.04 | 7.7307 | 46 |
| 1 2/6 | 113.28 | 7.8 | 47 |
| 1 3/6 | 113.79 | 7.811 | 48 |

| | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 28.2 | 25.4 | 25.4 | 25.9 | 26.5 | 27.2 | 27.5 | 27.3 | 27.7 |
| 2 | 36.4 | 34.6 | 34 | 34.4 | 34.3 | 34.1 | 34.5 | 34.5 | 34.9 |
| 3 | 37.6 | 38 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.2 | 37.4 | 37.3 | 37.4 |
| 5 | 37.7 | 38.6 | 38.4 | 38.2 | 38.1 | 38.1 | 38 | 38 | 38 |
| 15 | 37.5 | 38.5 | 38.3 | 38.1 | 38 | 37.9 | 37.9 | 37.8 | 37.8 |
| 6 | 37.8 | 39 | 34.7 | 38.6 | 38.5 | 38.4 | 38.4 | 38.4 | 38.2 |
| 7 | 38.1 | 39.6 | 39.5 | 39.4 | 39.3 | 39.2 | 39.1 | 39.1 | 39 |
| 8 | 37.8 | 39.3 | 39 | 38.9 | 38.8 | 38.6 | 38.6 | 38.5 | 38.4 |
| 17 | 36.2 | 35.6 | 35.1 | 35.1 | 34.8 | 34.7 | 34.8 | 34.6 | 34.7 |
| 4 | 38.3 | 39.8 | 39.7 | 39.6 | 39.5 | 39.4 | 39.4 | 39.3 | 39.2 |
| 14 | 37.6 | 38.9 | 38.6 | 38.5 | 38.3 | 38.2 | 38.2 | 38.1 | 38 |
| 9 | 37.9 | 39.4 | 39.2 | 39.2 | 39.1 | 39 | 38.9 | 38.9 | 38.8 |

T = 44°C

| distancia | AP/L | m _E | LOLA |
|-----------|--------|----------------|------|
| 0 | 0 | 0 | 50 |
| 2/6 | 108.02 | 4.7242 | 51 |
| 3/6 | 110.75 | 5.4824 | 52 |
| 4/6 | 112.03 | 7.2028 | 53 |
| 5/6 | 112.78 | 7.7052 | 54 |
| 1 | 113.04 | 8.0807 | 55 |
| 1 1/6 | 113.28 | 8.1089 | 56 |
| 1 2/6 | 113.53 | 8.2379 | 57 |
| 1 3/6 | 114.03 | 8.2781 | 58 |

| | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 31.4 | 27.1 | 27.6 | 28.2 | 29.3 | 29.3 | 29.5 | 30 | 30.2 |
| 2 | 41.5 | 37.6 | 37.8 | 37.5 | 37.8 | 38.2 | 37.9 | 37.6 | 38 |
| 3 | 42.5 | 41.6 | 41.6 | 41.7 | 41.3 | 41.4 | 41.2 | 40.9 | 41.2 |
| 5 | 42.6 | 42.7 | 42.5 | 42.3 | 42.1 | 42.1 | 42 | 41.8 | 41.8 |
| 15 | 42.4 | 42.6 | 42.4 | 42.2 | 42 | 42 | 41.8 | 41.7 | 41.7 |
| 6 | 42.7 | 43.1 | 42.9 | 42.7 | 42.5 | 42.4 | 42.3 | 42.2 | 42.2 |
| 7 | 42.6 | 43.9 | 43.7 | 43.6 | 43.5 | 43.4 | 43.2 | 43.1 | 43 |
| 8 | 42.5 | 43.5 | 43.3 | 43.1 | 42.9 | 42.7 | 42.6 | 42.5 | 42.4 |
| 17 | 40.9 | 39.8 | 39.3 | 38.6 | 38 | 38 | 37.9 | 38 | 38 |
| 4 | 42.8 | 44.1 | 44 | 43.8 | 43.7 | 43.6 | 43.5 | 43.3 | 43.2 |
| 14 | 42.5 | 43.1 | 42.8 | 42.7 | 42.4 | 42.3 | 42.2 | 42 | 42 |
| 9 | 42.4 | 43.7 | 43.5 | 43.4 | 43.2 | 43.1 | 43.1 | 42.9 | 42.8 |

$$\left[\frac{AP}{L} \right] = \left[\frac{\text{dina}}{\text{cm}} \right]$$

$$\left[m_E \right] = \left[g/s \right]$$

Separán

T = 50°C

| altura | ΔP/L | m _g | LOLA | | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 |
|--------|--------|----------------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 60 | 12 | 32.9 | 28.3 | 29.1 | 29.7 | 30.3 | 31 | 30.7 | 31.1 | 31.7 |
| 2/6 | 108.52 | 4.7328 | 61 | 2 | 45.4 | 41.3 | 41.3 | 41.8 | 41.1 | 41.2 | 41.5 | 41.3 | 42 |
| 3/6 | 110.27 | 6.1709 | 62 | 3 | 48.8 | 46.6 | 46.3 | 46 | 45.9 | 45.4 | 45.6 | 45.5 | 46 |
| 4/6 | 111.78 | 7.7124 | 63 | 5 | 48.8 | 47.5 | 47.2 | 47.1 | 46.8 | 46.5 | 46.3 | 46.5 | 47 |
| 5/6 | 112.28 | 8.3386 | 64 | 15 | 48.9 | 47.6 | 47.3 | 47.1 | 46.7 | 46.6 | 46.4 | 46.6 | 47.1 |
| 1 | 112.53 | 8.7373 | 65 | 6 | 49.4 | 48.1 | 47.9 | 47.5 | 47.3 | 47.2 | 46.9 | 47.2 | 47.7 |
| 1 1/6 | 113.03 | 8.8413 | 66 | 7 | 49.3 | 49.1 | 48.8 | 48.7 | 48.5 | 48.3 | 48.1 | 48.7 | 49.1 |
| 1 2/6 | 113.28 | 8.8596 | 67 | 8 | 49.1 | 48.7 | 48.3 | 48 | 47.8 | 47.6 | 47.4 | 47.5 | 47.8 |
| 1 3/6 | 113.54 | 8.9682 | 68 | 17 | 47.6 | 43.8 | 43.2 | 42.4 | 41.8 | 41.5 | 41.3 | 41.6 | 42.3 |
| | | | | 4 | 49.5 | 49.3 | 49.1 | 48.9 | 48.7 | 48.6 | 48.3 | 48.9 | 49.4 |
| | | | | 14 | 49.1 | 48.1 | 47.7 | 47.4 | 47.2 | 47 | 46.8 | 47.1 | 47.6 |
| | | | | 4 | 49.1 | 48.8 | 48.6 | 48.4 | 48.3 | 48.1 | 47.9 | 48.3 | 48.7 |

T = 54°C

| altura | ΔP/L | m _g | LOLA | | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 |
|--------|--------|----------------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 70 | 12 | 37.3 | 30.9 | 30.7 | 31.3 | 32.4 | 32.8 | 34.6 | 34 | 34.2 |
| 2/6 | 109.52 | 4.936 | 71 | 2 | 51.6 | 46.5 | 45.3 | 45.8 | 45.2 | 45.4 | 45.9 | 45.5 | 45.6 |
| 3/6 | 110.52 | 6.2624 | 72 | 3 | 54 | 51.6 | 50.9 | 50.7 | 50.3 | 50.2 | 50.3 | 49.7 | 49.9 |
| 4/6 | 11.78 | 8.0103 | 73 | 5 | 53.9 | 52.5 | 51.9 | 51.6 | 51.4 | 51.2 | 51.2 | 51 | 50.9 |
| 5/6 | 112.28 | 8.8353 | 74 | 15 | 53.7 | 52.5 | 52 | 51.7 | 51.4 | 51.2 | 51.2 | 51 | 50.9 |
| 1 | 112.53 | 9.1139 | 75 | 6 | 54 | 53 | 52.6 | 52.2 | 52 | 51.9 | 51.8 | 51.6 | 51.5 |
| 1 1/6 | 112.78 | 9.2463 | 76 | 7 | 54.1 | 53.9 | 53.7 | 53.5 | 53.4 | 53.2 | 53 | 52.9 | 52.7 |
| 1 2/6 | 113.03 | 9.3581 | 77 | 8 | 53.5 | 53.5 | 53.1 | 52.8 | 52.6 | 52.4 | 52.2 | 52 | 51.9 |
| 1 3/6 | 113.54 | 9.3815 | 78 | 17 | 51 | 48.7 | 47.8 | 46.2 | 45.9 | 45.4 | 45.8 | 45.6 | 45.6 |
| | | | | 4 | 54.4 | 54.1 | 53.9 | 53.7 | 53.6 | 53.3 | 53.2 | 53.1 | 53 |
| | | | | 14 | 53.8 | 53 | 52.6 | 53.3 | 52 | 51.7 | 51.6 | 51.5 | 51.4 |
| | | | | 9 | 53.8 | 53.7 | 53.5 | 53.2 | 53.2 | 53 | 52.8 | 52.6 | 52.5 |

$$[\Delta P/L] = [\text{dina/cm}]$$

$$[m_g] = [g/A]$$

Separán con fibras de carbón y grafito

T = 19°C

| altura | $\Delta\theta/L$ | mE | LOLA |
|--------|------------------|--------|------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2/6 | 111.03 | 3.193 | 1 |
| 3/6 | 113.53 | 4.671 | 2 |
| 4/6 | 114.03 | 5.695 | 3 |
| 5/6 | 114.29 | 6.1329 | 4 |
| 1 | 114.54 | 6.745 | 5 |
| 1 1/6 | 114.79 | 7.1162 | 6 |
| 1 2/6 | 115.04 | 7.1303 | 7 |
| 1 3/6 | 115.29 | 7.2388 | 8 |

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.4 | 19.3 | 19.4 |
| 2 | 19.3 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.7 |
| 3 | 19.1 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.5 | 19.5 | 19.5 |
| 5 | 19 | 19.2 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.4 |
| 15 | 18.5 | 18.8 | 18.8 | 18.8 | 18.8 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 |
| 6 | 19 | 19.1 | 19.2 | 19.2 | 19.2 | 19.2 | 19.2 | 19.2 | 19.2 |
| 7 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 |
| 8 | 18.8 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| 17 | 18.4 | 18.7 | 18.8 | 18.7 | 18.8 | 18.8 | 18.8 | 18.8 | 18.9 |
| 4 | 19.1 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.5 | 19.5 | 19.5 |
| 14 | 18.6 | 18.8 | 18.8 | 18.8 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 | 18.9 |
| 9 | 18.6 | 18.7 | 18.6 | 18.6 | 18.6 | 18.6 | 18.7 | 18.7 | 18.6 |

T = 24°C

| altura | $\Delta\theta/L$ | mE | LOLA |
|--------|------------------|--------|------|
| 0 | 0 | 0 | 10 |
| 2/6 | 112.53 | 3.5905 | 11 |
| 3/6 | 113.28 | 4.7576 | 12 |
| 4/6 | 113.53 | 6.1458 | 13 |
| 5/6 | 114.29 | 7.2883 | 14 |
| 1 | 114.79 | 7.6276 | 15 |
| 1 1/6 | 115.04 | 7.6581 | 16 |
| 1 2/6 | 115.29 | 7.7317 | 17 |
| 1 3/6 | 115.54 | 7.7794 | 18 |

| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 21.1 | 20 | 19.9 | 20 | 20 | 20.4 | 20.6 | 20.8 | 20.8 |
| 2 | 23.8 | 22.5 | 22.4 | 22.2 | 22.4 | 22.6 | 22.6 | 22.6 | 22.5 |
| 3 | 24 | 23.4 | 23.3 | 23.2 | 23.2 | 23.3 | 23.3 | 23.6 | 23.2 |
| 5 | 23.9 | 23.5 | 23.5 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 |
| 15 | 23.6 | 23.2 | 23.1 | 23 | 23 | 23 | 23.1 | 23.1 | 23 |
| 6 | 23.9 | 23.6 | 23.5 | 23.1 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.4 |
| 7 | 23.8 | 23.7 | 23.6 | 23.6 | 23.6 | 23.6 | 23.6 | 23.6 | 23.5 |
| 8 | 23.6 | 23.5 | 23.4 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 |
| 17 | 22.1 | 22.5 | 22.5 | 22.4 | 22.1 | 22.2 | 22.3 | 22.3 | 22.2 |
| 4 | 24 | 23.4 | 23.4 | 23.3 | 23.2 | 23.8 | 23.8 | 23.8 | 23.8 |
| 14 | 23.6 | 23.3 | 23.3 | 23.2 | 23.1 | 23.1 | 23.1 | 23.1 | 23 |
| 9 | 23.5 | 23.5 | 23.4 | 23.4 | 23.4 | 23.3 | 23.3 | 23.3 | 23.3 |

$$\{\Delta\theta/L\} = \{\text{dima}/\text{cm}\}$$

$$\{mE\} = \{g/g\}$$

Separán con fibras de carbón y grafito

T = 29°C

| abertura | $\Delta P/L$ | m_e | LOCA |
|----------|--------------|--------|------|
| 0 | 0 | 0 | 20 |
| 2/6 | 115.04 | 3.6625 | 21 |
| 3/6 | 115.54 | 4.8336 | 22 |
| 4/6 | 166.29 | 6.5606 | 23 |
| 5/6 | 116.54 | 7.55 | 24 |
| 1 | 116.79 | 7.8344 | 25 |
| 1 1/6 | 117.04 | 7.8658 | 26 |
| 1 2/6 | 117.29 | 7.9731 | 27 |
| 1 3/6 | 117.55 | 8.042 | 28 |

| | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 24.7 | 21.6 | 20.8 | 21.4 | 22.1 | 22.5 | 22.8 | 22.9 | 22.9 |
| 2 | 29.2 | 26.7 | 25.7 | 25.8 | 25.9 | 26.1 | 26.2 | 26.4 | 26.2 |
| 3 | 29.5 | 28.6 | 27.9 | 27.6 | 27.6 | 27.7 | 27.6 | 27.7 | 27.9 |
| 5 | 29.5 | 28.9 | 28.4 | 28.2 | 28.1 | 28.9 | 28.1 | 28.1 | 28.2 |
| 15 | 29.1 | 28.7 | 28.2 | 27.9 | 27.9 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| 6 | 29.5 | 29.1 | 28.6 | 28.3 | 28.3 | 28.1 | 28.2 | 28.2 | 28.4 |
| 7 | 29.5 | 29.4 | 29.1 | 28.8 | 28.8 | 28.3 | 28.7 | 28.6 | 29 |
| 8 | 29.1 | 29.1 | 28.7 | 28.4 | 28.3 | 28.7 | 28.2 | 28.2 | 28.3 |
| 17 | 26.8 | 27.8 | 26.7 | 26.3 | 26.3 | 26.4 | 26.4 | 26.3 | 26.4 |
| 4 | 29.7 | 29.6 | 29.3 | 29.1 | 29 | 27.7 | 28 | 28.8 | 29.2 |
| 14 | 29.1 | 28.9 | 28.4 | 28.1 | 28 | 28 | 28 | 27.9 | 28.2 |
| 9 | 29.2 | 29.1 | 28.8 | 28.5 | 28.5 | 28.3 | 28.4 | 28.3 | 28.6 |

T = 34°C

| abertura | $\Delta P/L$ | m_e | LOCA |
|----------|--------------|--------|------|
| 0 | 0 | 0 | 30 |
| 2/6 | 110.27 | 4.0194 | 31 |
| 3/6 | 113.28 | 5.0948 | 32 |
| 4/6 | 114.29 | 6.8673 | 33 |
| 5/6 | 114.79 | 7.5708 | 34 |
| 1 | 115.04 | 7.8292 | 35 |
| 1 1/6 | 115.29 | 8.1807 | 36 |
| 1 2/6 | 115.54 | 8.1897 | 37 |
| 1 3/6 | 115.79 | 8.3415 | 38 |

| | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 11 | 27.9 | 22.6 | 22.6 | 23.1 | 23.5 | 23.2 | 23.3 | 24.2 | 24.3 |
| 2 | 34.2 | 29.4 | 29.2 | 29.7 | 29.5 | 29.2 | 29.3 | 29.4 | 29.6 |
| 3 | 34.2 | 32.5 | 32.4 | 32.3 | 32.1 | 31.8 | 31.9 | 31.9 | 31.9 |
| 5 | 34.7 | 33.3 | 33.2 | 33.1 | 33 | 32.6 | 32.7 | 32.6 | 32.6 |
| 15 | 34.3 | 33.3 | 33.1 | 32.9 | 32.8 | 32.6 | 32.5 | 32.5 | 32.4 |
| 6 | 34.6 | 33.7 | 33.5 | 33.4 | 33.2 | 33 | 32.9 | 32.9 | 32.8 |
| 7 | 34.5 | 34.3 | 34.2 | 34.1 | 34 | 33.9 | 33.8 | 33.7 | 33.6 |
| 8 | 34.4 | 33.9 | 33.8 | 33.6 | 33.4 | 33.3 | 33.3 | 33 | 33 |
| 17 | 30.7 | 31.2 | 31.2 | 31 | 30.5 | 30.2 | 30 | 30.2 | 30.2 |
| 4 | 34.7 | 34.6 | 34.4 | 34.3 | 34.2 | 34.1 | 34 | 33.8 | 33.8 |
| 14 | 34.3 | 33.5 | 33.4 | 33.2 | 33.1 | 32.9 | 32.8 | 32.7 | 32.8 |
| 9 | 34.2 | 34.1 | 34 | 33.8 | 33.7 | 33.6 | 33.6 | 33.4 | 33.4 |

$$[\Delta P/L] = [dina/cm]$$

$$[m_e] = [g/A]$$

Separán con fibras de carbón y grafito

T = 40°C

| distancia | $\Delta P/L$ | \dot{m}_E | LOLA | | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
|-----------|--------------|-------------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 40 | 12 | 31.3 | 25.1 | 24.7 | 24.7 | 25.2 | 25.8 | 25.8 | 25.8 | 26.5 |
| 2/6 | 111.53 | 4.1622 | 41 | 2 | 39.6 | 34.6 | 33.9 | 33.4 | 33.6 | 33.5 | 33.5 | 33.4 | 33.7 |
| 3/6 | 113.53 | 5.82 | 42 | 3 | 40.2 | 38.2 | 37.9 | 37.4 | 36.9 | 37.2 | 37 | 36.7 | 37 |
| 4/6 | 114.54 | 7.1264 | 43 | 5 | 40.2 | 39.1 | 38.9 | 38.5 | 38.3 | 38.3 | 38 | 37.9 | 37.9 |
| 5/6 | 114.79 | 7.6252 | 44 | 15 | 39.9 | 39.1 | 38.8 | 38.5 | 38.4 | 38.3 | 38 | 37.9 | 37.8 |
| 1 | 115.04 | 7.8628 | 45 | 6 | 40.2 | 39.6 | 39.3 | 39 | 38.8 | 38.7 | 38.4 | 38.3 | 38.3 |
| 1 1/6 | 115.29 | 8.4719 | 46 | 7 | 40.5 | 40.4 | 40.3 | 40.1 | 40 | 39.7 | 39.6 | 39.5 | 39.3 |
| 1 2/6 | 115.54 | 8.5443 | 47 | 8 | 39.7 | 39.9 | 39.7 | 39.2 | 39.2 | 39.1 | 38.8 | 38.6 | 38.5 |
| 1 3/6 | 116.04 | 8.7378 | 48 | 17 | 34.8 | 36.5 | 36.1 | 35.4 | 35.2 | 35.2 | 34.8 | 34.7 | 34.9 |
| | | | | 4 | 40.7 | 40.5 | 40.3 | 40.2 | 40 | 39.8 | 39.6 | 39.5 | 39.5 |
| | | | | 14 | 39.9 | 39.5 | 39.2 | 38.9 | 38.7 | 38.6 | 38.3 | 38.2 | 38.1 |
| | | | | 9 | 40 | 40.2 | 40.1 | 40.2 | 40 | 39.7 | 38.8 | 38.9 | 38.9 |

T = 44°C

| distancia | $\Delta P/L$ | \dot{m}_E | LOLA | | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 |
|-----------|--------------|-------------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 50 | 12 | 31.1 | 26.8 | 26 | 26.3 | 27.1 | 27.9 | 27.9 | 28.4 | 28.7 |
| 2/6 | 111.78 | 4.6455 | 51 | 2 | 43 | 37.8 | 36.8 | 36.2 | 36.4 | 36.6 | 36.4 | 36.8 | 36.8 |
| 3/6 | 113.53 | 5.679 | 52 | 3 | 44.1 | 41.7 | 41 | 40.8 | 40.6 | 40.3 | 40.4 | 40.2 | 40.1 |
| 4/6 | 114.54 | 7.2082 | 53 | 5 | 44.1 | 42.7 | 42.3 | 41.9 | 41.8 | 41.6 | 41.5 | 41.3 | 41.2 |
| 5/6 | 114.79 | 8.0408 | 54 | 15 | 43.8 | 42.6 | 42.4 | 42.5 | 41.8 | 41.7 | 41.5 | 41.3 | 41.3 |
| 1 | 115.04 | 8.534 | 55 | 6 | 44.2 | 43.1 | 42.9 | 43.7 | 43.3 | 42.1 | 42 | 41.8 | 41.7 |
| 1 1/6 | 115.29 | 8.8934 | 56 | 7 | 44.2 | 44 | 43.8 | 43.9 | 43.5 | 43.3 | 43.2 | 43 | 42.8 |
| 1 2/6 | 115.44 | 8.9638 | 57 | 8 | 43.9 | 43.5 | 43.3 | 43.4 | 42.7 | 42.5 | 42.3 | 42.2 | 42 |
| 1 3/6 | 116.29 | 9.1206 | 58 | 17 | 40.7 | 39.7 | 40.1 | 38.6 | 38.2 | 38.1 | 38 | 37.9 | 38 |
| | | | | 4 | 44.4 | 44.2 | 44 | 43.8 | 43.7 | 43.5 | 43.3 | 43.3 | 43.1 |
| | | | | 14 | 43.9 | 43.1 | 42.9 | 42.4 | 42.2 | 42 | 41.8 | 41.7 | 41.6 |
| | | | | 9 | 43.9 | 43.8 | 43.6 | 43.4 | 43.3 | 43.1 | 43 | 42.8 | 42.8 |

$$[\Delta P/L] = [\text{dina/cm}]$$

$$[\dot{m}_E] = [g/s]$$

Separán con fibras de carbón y grafito

T = 50°C

| altura | $\Delta P/L$ | m_E | LOLA | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | |
|--------|--------------|--------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 60 | 12 | 37.2 | 28.6 | 28.1 | 28.3 | 28.6 | 29.2 | 29.7 | 29.9 | 30.6 |
| 2/6 | 111.03 | 4.6552 | 61 | 2 | 48.9 | 42.1 | 41.2 | 40.6 | 40.2 | 40.4 | 40.7 | 41 | 41.3 |
| 3/6 | 113.53 | 5.7215 | 62 | 3 | 49.5 | 46.5 | 46.3 | 45.1 | 44.8 | 44.9 | 45.3 | 45.9 | 46.2 |
| 4/6 | 114.54 | 7.5181 | 63 | 5 | 49.3 | 47.7 | 47.3 | 46.5 | 46.1 | 48.1 | 46.7 | 47.4 | 47.4 |
| 5/6 | 114.79 | 8.4112 | 64 | 15 | 49.1 | 47.7 | 47.4 | 46.7 | 46.3 | 46.2 | 47 | 47.6 | 47.6 |
| 1 | 115.04 | 9.0226 | 65 | 6 | 49.4 | 48.3 | 48 | 47.3 | 46.9 | 46.6 | 47.6 | 48.1 | 48.1 |
| 1 1/6 | 115.29 | 9.087 | 66 | 7 | 49.5 | 49.3 | 48.8 | 48.6 | 48.3 | 48.2 | 49.2 | 49.8 | 49.6 |
| 1 2/6 | 115.54 | 9.2186 | 67 | 8 | 49 | 48.7 | 48.5 | 47.8 | 47.4 | 47.2 | 47.8 | 48.5 | 48.5 |
| 1 3/6 | 116.04 | 9.3639 | 68 | 17 | 44.9 | 44.1 | 44.7 | 42.2 | 41.8 | 41.7 | 42.6 | 43.1 | 43.1 |
| | | | | 4 | 49.8 | 49.5 | 49 | 48.8 | 48.5 | 48.4 | 49.5 | 50 | 49.8 |
| | | | | 14 | 49.1 | 48.2 | 48 | 47.2 | 46.8 | 46.6 | 47.5 | 48 | 48 |
| | | | | 9 | 49.2 | 49.1 | 48.6 | 48.4 | 48.1 | 48 | 49 | 49.5 | 49.4 |

T = 54°C

| altura | $\Delta P/L$ | m_E | LOLA | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | |
|--------|--------------|--------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 70 | 12 | 39.2 | 30.1 | 30.1 | 30 | 30.9 | 31.1 | 32.5 | 32.6 | 33.1 |
| 2/6 | 111.53 | 5.4112 | 71 | 2 | 53.7 | 45.5 | 45 | 44.1 | 44.2 | 44 | 44.6 | 45 | 45.4 |
| 3/6 | 113.79 | 6.3498 | 72 | 3 | 54.5 | 51.1 | 50.6 | 49.8 | 49.6 | 49.1 | 49.5 | 49.8 | 50.5 |
| 4/6 | 114.79 | 7.9931 | 73 | 5 | 54.3 | 52.5 | 52 | 51.3 | 51.1 | 50.9 | 51 | 51.4 | 51.8 |
| 5/6 | 115.04 | 8.9116 | 74 | 15 | 54.1 | 52.6 | 52.2 | 51.7 | 51.3 | 51.2 | 51.1 | 51.5 | 52.1 |
| 1 | 115.29 | 9.212 | 75 | 6 | 54.4 | 53.2 | 52.9 | 52.2 | 51.9 | 51.8 | 51.7 | 52 | 52.7 |
| 1 1/6 | 115.54 | 9.3678 | 76 | 7 | 54.6 | 54.3 | 54 | 53.8 | 53.6 | 53.4 | 53.4 | 54.1 | 54.6 |
| 1 2/6 | 116.29 | 9.4017 | 77 | 8 | 54 | 53.7 | 53.4 | 53 | 52.6 | 52.3 | 52.1 | 52.4 | 53 |
| 1 3/6 | 116.55 | 9.7877 | 78 | 17 | 47.5 | 48.2 | 48.5 | 47 | 46.1 | 42.6 | 46.4 | 46.7 | 47.2 |
| | | | | 4 | 54.9 | 54.5 | 54.2 | 54 | 53.8 | 53.6 | 53.6 | 54.2 | 54.8 |
| | | | | 14 | 54.2 | 53.2 | 53 | 52.3 | 52 | 52.7 | 52.7 | 52.1 | 52.7 |
| | | | | 9 | 54.3 | 54.1 | 53.8 | 53.6 | 53.4 | 53.2 | 53.1 | 53.7 | 54.3 |

$$[\Delta P/L] = [\text{dina/cm}]$$

$$[m_E] = [g/g]$$

SECUENCIA DE CALCULO

El objetivo del presente estudio es obtener el coeficiente convectivo de transferencia de calor de cuatro tipos de soluciones, dos newtonianas: glicerina y glicerina con fibras de carbón y grafito, y dos no newtonianas: Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada con fibras de carbón y grafito.

A partir del volumen y el tiempo obtenidos experimentalmente, se calcula el flujo volumétrico

$$Q = \frac{V}{t} \quad [cm^3/s]$$

Multiplicando el gasto volumétrico por la densidad de cada solución a la temperatura de salida, correspondiente a cada gasto, se obtiene el gasto másico.

$$\dot{m} = \rho Q \quad [g/s]$$

Se comprobó que para todos los gastos obtenidos, se tenía flujo laminar, calculando el número de Reynolds y comparándolo con el número de Reynolds crítico para flujo interno ($Re_{D_c} \approx 2300$)

$$Re_D = \frac{\rho U_m D_h}{\mu}$$

donde

$$\dot{m} = \rho U_m A_c \quad \rightarrow \quad U_m = \frac{\dot{m}}{\rho A_c} \quad [cm/s]$$

$$A_c = a \times b \quad [cm^2]$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4(a \times b)}{a+b} \quad [cm]$$

para la tubería utilizada tenemos que

$$A_c = (0.9 \text{ cm}) (2.19 \text{ cm}) = 1.971 \text{ cm}^2$$

$$D_h = \frac{4(0.9 \text{ cm})(2.19 \text{ cm})}{(0.9 + 2.19) \text{ cm}} = 2.5515 \text{ [cm]}$$

El objetivo principal del estudio es el cálculo del coeficiente medio convectivo de transferencia de calor \bar{h}_c , para toda la tubería a diferentes gastos, manteniendo constante la temperatura de pared ($T_s = T_w$), para comparar el cambio que sufre este coeficiente \bar{h}_c en una sustancia sola con respecto a la misma con fibras de carbón y grafito.

Se tiene que el flujo de calor es igual a:

$$q = \dot{m} c_p \Delta T \quad [\text{cal}/\text{s}]$$

pero además el flujo de calor convectivo para flujo interno a temperatura de pared constante ($T_s = T_w$) es igual a:

$$q = \bar{h}_L A_s \Delta T_{\ln} \quad [\text{cal}/\text{s}]$$

igualando ambas ecuaciones se tiene:

$$\dot{m} c_p \Delta T = \bar{h}_L A_s \Delta T_{\ln}$$

despejando el coeficiente de transferencia de calor

$$\bar{h}_L = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{A_s \Delta T_{\ln}} \quad \left[\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{s } ^\circ\text{C}} \right]$$

donde: \dot{m} es el gasto másico en $[\text{g}/\text{s}]$

c_p es el calor específico a presión constante en $[\text{cal}/\text{g } ^\circ\text{C}]$

ΔT es la diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del fluido en la sección en estudio

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad [^\circ\text{C}]$$

A_s es el área de transmisión de calor

$$A_s = (a+b) L \quad [\text{cm}^2]$$

ΔT_{\ln} es la diferencia de temperaturas logarítmica medida en $[^\circ\text{C}]$

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad \text{siendo} \quad \begin{aligned} \Delta T_1 &= T_s - T_1 \quad [^\circ\text{C}] \\ \Delta T_2 &= T_s - T_2 \quad [^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

T_s es la temperatura de pared de la tubería ($T_s = T_w$) en $[^\circ\text{C}]$

T_1 es la temperatura a la entrada del fluido a la sección en estudio en $[^\circ\text{C}]$

T_2 es la temperatura de salida del fluido de la sección en estudio en $[^\circ\text{C}]$

T_1 = temperatura que marca el termopar número 12 en $[^\circ\text{C}]$

T_2 = temperatura que marca el termopar número 7 en $[^\circ\text{C}]$

$L =$ distancia entre el termopar número 12 y el número 7 en [cm]

$$L = 126.2 \text{ cm}$$

por lo tanto

$$A_s = (a+b)L = (2.19 + 0.9) \text{ cm} (126.2 \text{ cm})$$

$$A_s = 389.958 \text{ cm}^2$$

Suposiciones.

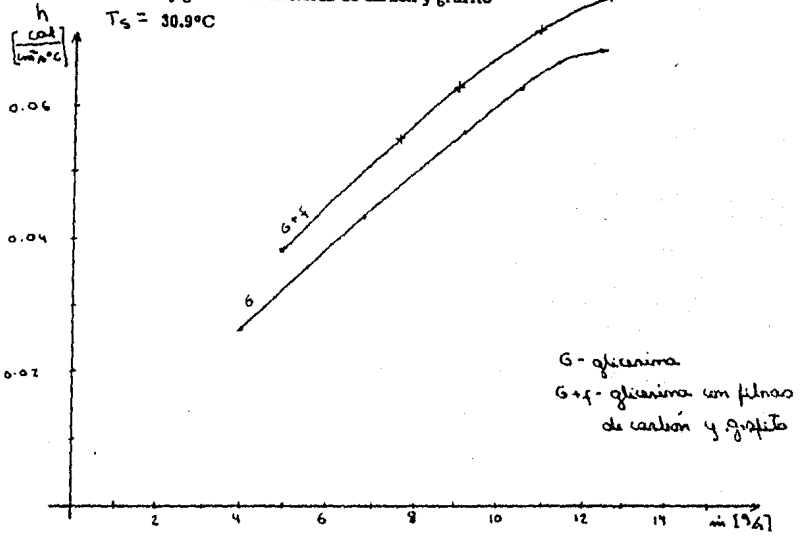
- 1) Flujo plenamente desarrollado.
- 2) Las temperaturas marcadas por los termopares que miden la temperatura del fluido en estudio, son temperaturas medias del mismo.
- 3) La temperatura de la pared de la tubería es igual a la temperatura del agua, que sirve como medio de calentamiento, y es constante a lo largo de toda la sección en estudio
- 4) Son despreciables los cambios de energía cinética y potencial.
- 5) Flujo incomprensible.
- 6) Se desprecia la transferencia de calor por conducción y radiación.
- 7) No hay generación interna de calor.
- 8) La tubería no sufre ningún cambio en sus dimensiones debido al calor.

RESULTADOS

**GRAFICAS DEL COEFICIENTE
CONVECTIVO DE TRANSFERENCIA
DE CALOR VS. GASTO MASICO**

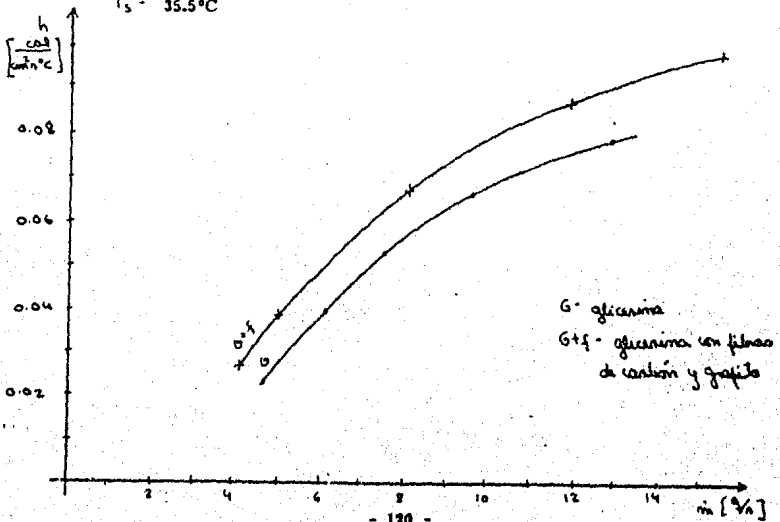
Glicerina y glicerina con fibras de carbón y grafito

$T_s = 30.9^\circ\text{C}$

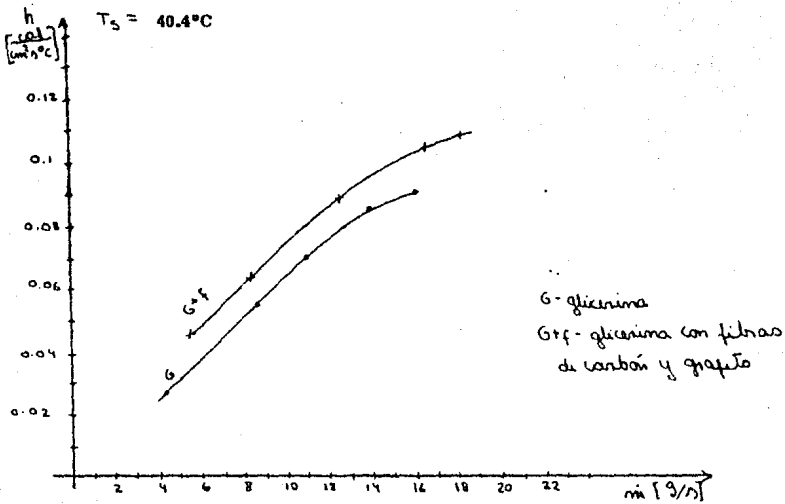


Glicerina y glicerina con fibras de carbón y grafito

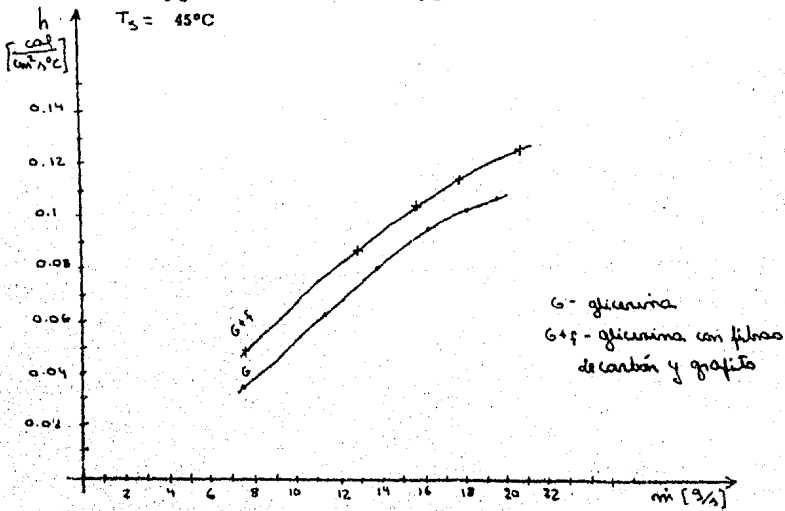
$T_s = 35.5^\circ\text{C}$



Glicerina y glicerina con fibras de carbón y grafito

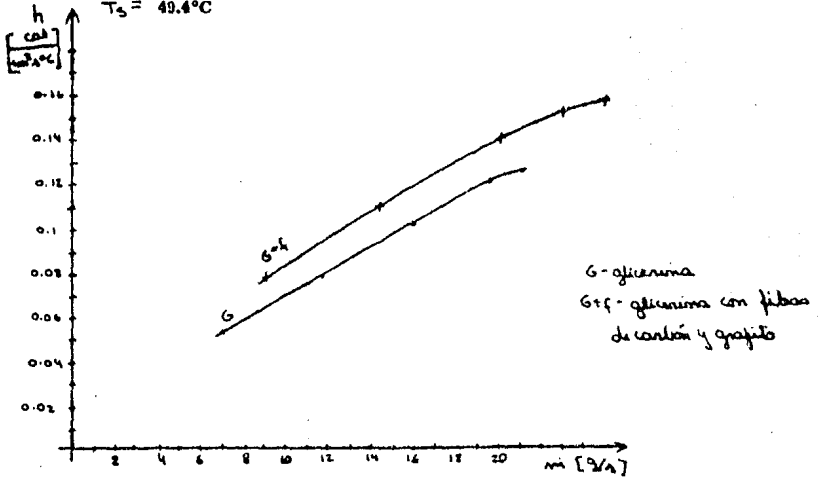


Glicerina y glicerina con fibras de carbón y grafito



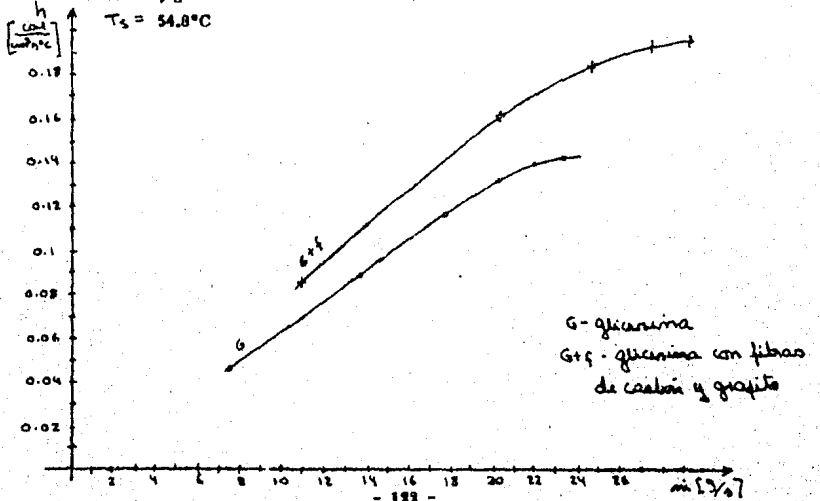
Glicerina y glicerina con fibras de carbón y grafito

$T_s = 49.4^\circ\text{C}$

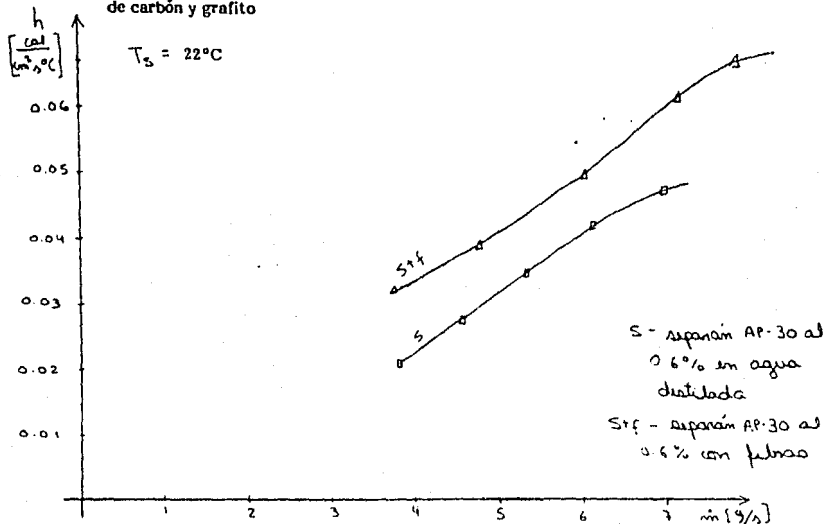


Glicerina y glicerina con fibras de carbón y grafito

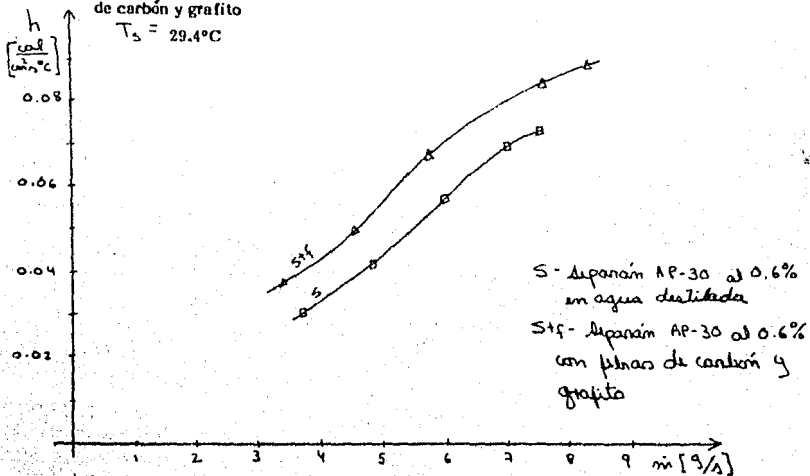
$T_s = 54.8^\circ\text{C}$



Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito

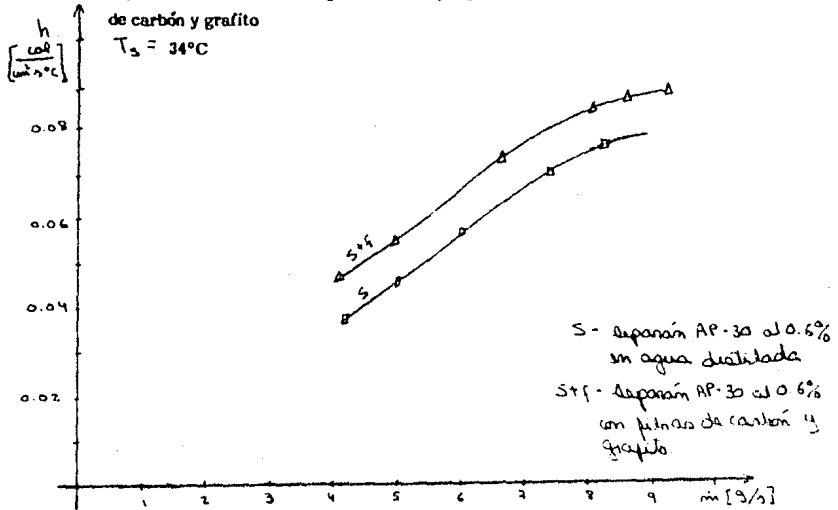


Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito



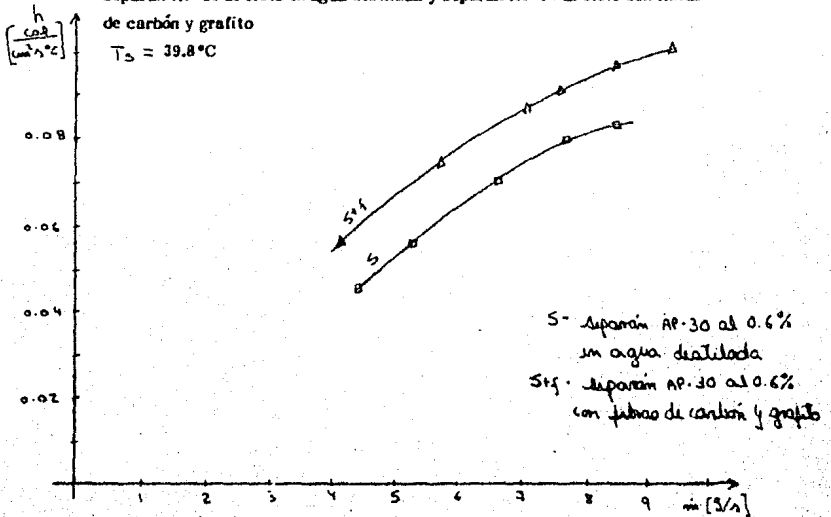
Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito

$T_s = 34^\circ\text{C}$



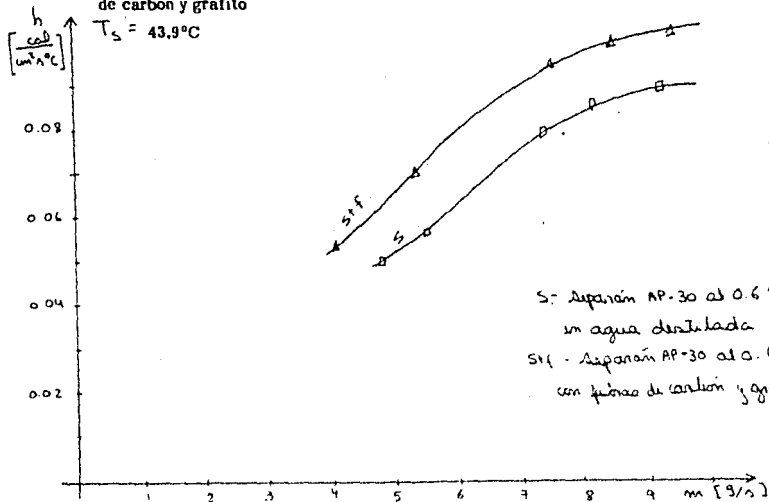
Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito

$T_s = 39.8^\circ\text{C}$



Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito

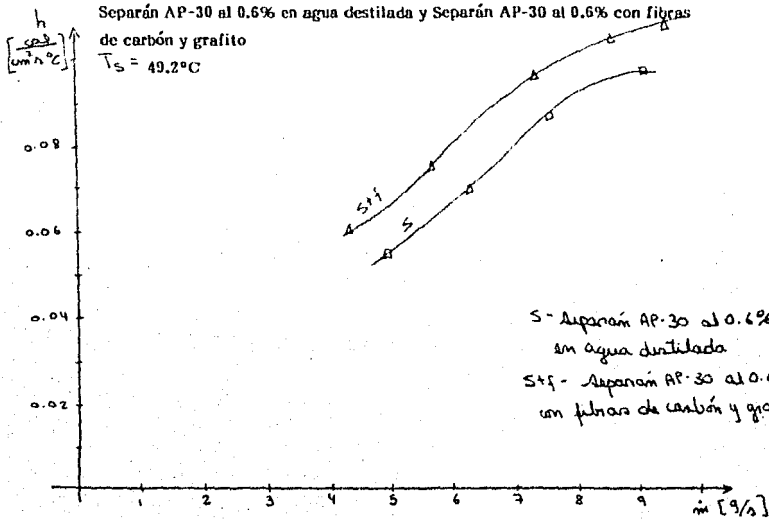
$T_s = 43.9^\circ\text{C}$



S - Separán AP-30 al 0.6%
 en agua destilada
 S+f - Separán AP-30 al 0.6%
 con fibras de carbón y grafito

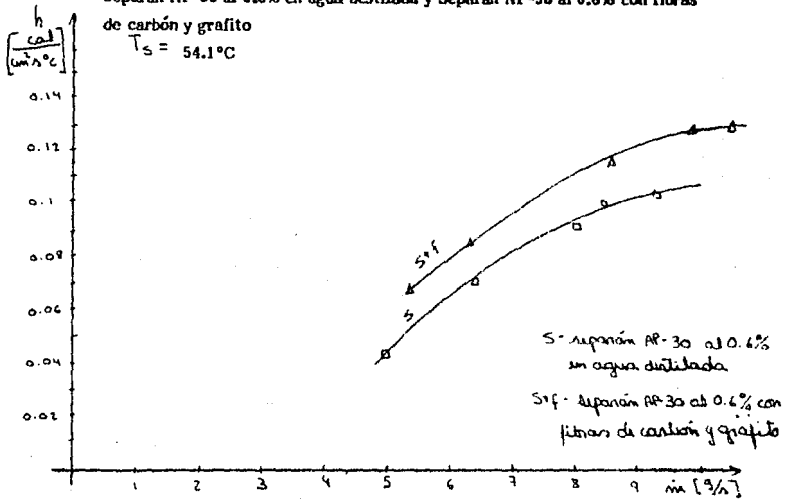
Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito

$T_s = 49.2^\circ\text{C}$



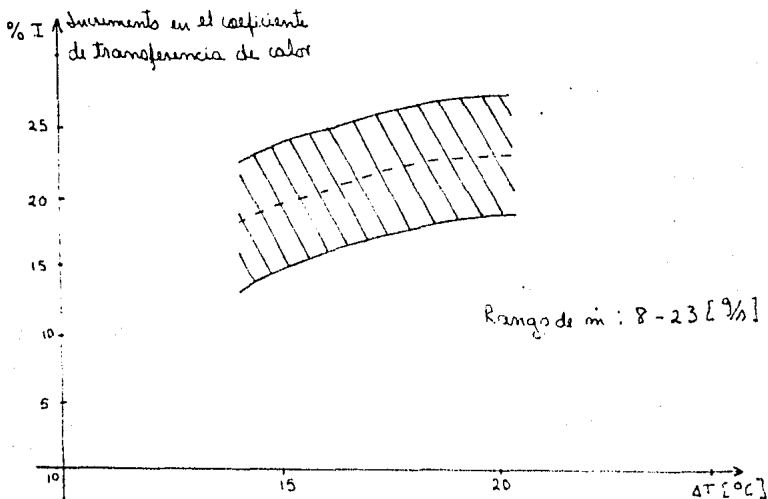
S - Separán AP-30 al 0.6%
 en agua destilada
 S+f - Separán AP-30 al 0.6%
 con fibras de carbón y grafito

Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito
 $T_s = 54.1^\circ\text{C}$

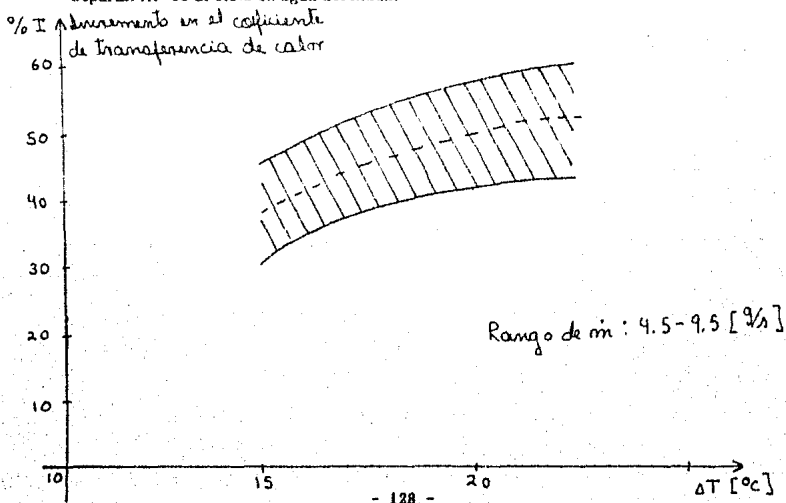


**GRAFICAS DEL INCREMENTO DEL
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR, EN
PORCENTAJE, VS. DIFERENCIA DE TEMPERATURAS**

Glicerina con fibras de carbón y grafito comparada con glicerina al 86% y 14% de agua



Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito comparado con Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada.



CONCLUSIONES

En el presente estudio se cubren dos conceptos básicamente; la obtención de las propiedades de los fluidos en estudio, tanto newtonianos (glicerina al 86% y 14% de agua y glicerina al 86% con fibras de carbón y grafito) como de los no newtonianos (Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada y Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito).

El segundo concepto por cubrir y el objetivo principal del trabajo es la obtención del coeficiente convectivo medio de transferencia de calor a través de una tubería rectangular a bajos números de Reynolds.

Experimentalmente se obtuvieron la densidad y viscosidad de la glicerina al 86% con y sin fibras de carbón y grafito, y la viscosidad del Separán AP-30 al 0.6% con y sin fibras de carbón y grafito.

El calor específico y la conductividad térmica de la glicerina se obtuvieron por medio de correlaciones empíricas para una mezcla de líquidos. La densidad, calor específico y conductividad térmica del Separán AP-30 al 0.6% son las del agua, ya que como se trata de una solución acuosa de polímeros a baja concentración, estas propiedades no varían en forma apreciable con respecto a las del agua.

La concentración de fibras de carbón y grafito en ambos fluidos es muy baja ($9.847 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ de fibras) por lo cual las propiedades físicas son muy similares; para la glicerina con fibras de carbón y grafito la densidad como la viscosidad son levemente mayores (menos del 1%) comparadas con las de la glicerina sin fibras. Para el caso del Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito la única propiedad que varía un poco es la viscosidad, siendo levemente mayor (aproximadamente un 5%), comparándola con la del Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor se obtuvo en $[\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}}]$ debido a que todos los valores obtenidos experimentalmente se encontraban en estas unidades.

Comparando los dos fluidos newtonianos (glicerina al 86% y 14% de agua con glicerina al 86% con fibras de carbón y grafito) se observa que el coeficiente medio de transferencia de calor es mayor para la glicerina con fibras. Entre mayor es la diferencia de temperaturas (entre la temperatura de entrada y de salida de la tubería del fluido) mayor es el aumento del coeficiente de transferencia de calor; para

un rango de gasto másico entre 8 y 23 [$\frac{g}{s}$], el incremento promedio del coeficiente de transferencia de calor en la glicerina con fibras es aproximadamente del 21%. Este aumento se debe a que las fibras de carbón y grafito son conductoras y así actúan estando en suspensión dentro de la glicerina, lo cual provoca el aumento del coeficiente de transferencia de calor.

Al comparar los dos fluidos no newtonianos (Separán AP-30 al 0.6% con fibras de carbón y grafito contra el Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada) se observa también un incremento en el coeficiente medio convectivo de transferencia de calor en el Separán con fibras, siendo mucho mayor que para el caso del fluido newtoniano. Entre mayor es el rango de diferencia de temperaturas (entre la temperatura de entrada y salida de la tubería del fluido), mayor es el incremento en el coeficiente de transferencia de calor, siendo aproximadamente, en valor promedio, de un 47% el aumento en el coeficiente de transferencia de calor para el Separán con fibras de carbón y grafito, para un rango de gasto másico entre el 4.5 al 9.5

Aproximadamente el 20% de este aumento se debe a lo mismo que para el caso del fluido newtoniano, a que las fibras de carbón y grafito son conductoras, por lo cual la solución con fibras absorbe mayor cantidad de calor que la solución sin fibras, lo que produce un aumento en el coeficiente convectivo de transferencia de calor. El otro 27 a 30% aproximadamente, se debe a que en un líquido viscoelástico (como es el Separán AP-30 al 0.6% en agua destilada), a través de tubos de sección no circular aparecen flujos secundarios que repercuten en las características del flujo y provocan un aumento en el coeficiente de transferencia de calor, como lo reporta B. Mena, D. R. Oliver y Hartnett J. P.

BIBLIOGRAFIA

Academia Nacional de Ingeniería, A. C. "Memoria de II Congreso". Vol. II.

Barnes H. A., Jowensend P. and Walters K. "Rheol." Acta 10 (1971) 517.

Bosart and Snoddy. "Ind. Eng. Chem." 20, (1928), 1378

Brown A. I. and Marco S.M. "Introduction to Heat transfer". Mc. Graw - Hill Book Company. 3rd. edition. New York. 1958.

Byron Bird R., Armstrong Robert C. and Hassager Ole. "Dynamic of Polymeric liquids". Volume I, John Wiley & Sons. 1st. edition. U.S.A. 1977.

Dodson A.G., Townsend, P. and Walters, K. "Rheol." Acta 10 (1971) 508.

Fleming D.P. and Spanow E.M., "Flow in the hydrodynamic entrance region of ducts of arbitrary cross-section". J. Heat transfer 91, (1969), 345 - 354.

Gunn R. W., Mena B. and Walters K. "Z.A.M.P." Vol. 25 (1974) 591

Hartnett James P. and Kostic Milivaje. "Heat transfer to a viscoelastic fluid in laminar flow through a rectangular channel". Vol. 28 No. 6. Great Britain. 1985.

Holman J. P. "Experimental methods for Engineers". Mc. Graw - Hill Book Co. 2nd. edition. U.S.A. 1971.

Ibid Proceedings 6th. International Congress of Theology. Lyon, France. 1972.

Incopera Frank P., De Witt David P. "Fundamentals of Heat Transfer". John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 1981.

Kaye A. and Mena B. "Chem. Eng. Sci." 1977

Kreyszig Erwin. "Advanced Engineering Mathematics". John Wiley & Sons, Inc. 3rd. edition. U.S.A. 1972.

Mena B., Best G., Bautista P. and Sánchez T. "Heat transfer in non-newtonian flow through pipes". Rheol. Acta 17, (1978), 455 - 457.

Metzner A. B. "Heat transfer in non-newtonian fluids". *Adv. Heat Transfer* 2 (1965) 357 - 397.

Oliver D. R. "Non-newtonian heat transfer: an interesting effect observed in noncircular tubes". *trans. Inst. Chem. Engrs.* 47 (1969), T 18 - T 20.

Özisik M. Necati. "Transferencia de Calor". Mc. Graw Hill. 1a. edición. México. 1980

Perry and Chilton. "Chemical Engineer's Hand book". Ed. Mc. Graw Hill. 3rd. edition. 1977.

Reid Robert, Prausnitz John M., Sherwood Thomas K. "The properties of gases and liquids". Mc Graw Hill 3rd. edition. 1977.

Reiner M. "Deformation, Strain and Flow. An Elementary Introduction to Rheology". Lewis, 3rd. edition. London. 1969.

Reynolds and Perkins. "Ingeniería termodinámica". Editorial Mc Graw Hill. Traducción de la 2a. edición en inglés. 1980. México.

Schovalter William R. "Mechanics of non-newtonian fluids". Pergamon Press. 1st. edition. Great Britain. 1978.

Sprink L. K. "Principles and Practice of flow meter Engineering". The Foxboro Company. 9th. edition. 1972.

Walters K. "Rheometry". Champman and Hall Ltd. 1st. published. Great Britain. 1975.

White Frank M. "Mecánica de fluidos". Mc Graw Hill. 1a. edición. México. 1980.

Yoo S. S. "Heat transfer and friction factor for non-newtonian fluids". Ph. D. thesis, University of Illinois at Chicago. 1977.