

ÍNDICE

	<u>Paginas</u>
<u>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</u>	
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Resumen.....	3
1.4 Fases del Proyecto.....	4
<u>CAPÍTULO 2. HISTORIA Y CONCEPTOS BÁSICOS DE LA REOLOGÍA</u>	
2.1 Reología.....	7
2.1.1 Definición.....	7
2.1.2 Historia de la reología.....	7
2.2 Viscosidad.....	11
2.2.1 Definición.....	11
2.2.2 Tipos de viscosidad.....	13
2.3 Unidades.....	14
2.4 Variables que influyen en la viscosidad.....	16
2.4.1 Variación con la velocidad de deformación.....	16
2.4.2 Variación con la temperatura.....	17
2.4.3 Variación con la presión.....	18
2.5 Índice de viscosidad.....	18
<u>CAPÍTULO 3. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS</u>	
3.1 Introducción.....	21
3.2 Tipos de fluidos.....	21
3.2.1 Fluidos Newtonianos.....	23
3.2.2 Fluidos No Newtonianos.....	24
3.2.2.1 Independientes del tiempo de aplicación.....	24
3.2.2.1.1 Fluidos pseudoplásticos.....	24
3.2.2.1.2 Fluidos dilatantes.....	27
3.2.2.1.3 Fluidos plásticos.....	28
3.2.2.2 Dependientes del tiempo de aplicación.....	30
3.2.2.2.1 Fluidos tixotrópicos.....	30
3.2.2.2.2 Fluidos reopécticos.....	33
3.2.3 Fluidos Viscoelásticos.....	33
3.3 Clasificación de fluidos en base a modelos avanzados.....	34
3.3.1 Modelo de Herschel-Bulkley.....	34
3.3.2 Modelo de Carreau.....	35
3.4 Tabla Resumen.....	36

CAPÍTULO 4. TIPOS DE VISCOSÍMETROS Y REÓMETROS.

4.1	Introducción.....	38
4.2	Viscosímetros.....	38
4.2.1	Clasificaciones.....	38
4.2.2	Descripción	
4.2.2.1	Viscosímetro caída de esfera.....	40
4.2.2.2	Viscosímetro caída de cuerpo.....	41
4.2.2.3	Viscosímetro Saybolt.....	42
4.2.2.4	Viscosímetro Engler.....	43
4.2.2.5	Viscosímetros capilares.....	44
4.2.2.5.1	Tubo de vidrio.....	46
4.2.2.6	Viscosímetro rotacionales.....	47
4.2.2.7	Viscosímetro Stormer.....	49
4.2.2.8	Viscosímetro Brookfield.....	50
4.2.2.9	Viscosímetro placas deslizantes.....	51
4.3	Reómetros.....	52
4.3.1	Reómetros capilares.....	52
4.3.1.1	Viscosímetros de cilindro pistón.....	54
4.3.2	Reómetro rotacional.....	55
4.3.2.1	Reómetro rotatorio.....	55
4.3.2.1.1	Cilindro - coaxial (Couette).....	56
4.3.2.1.2	Cono y Placa.....	57
4.3.3	Magneto reómetro.....	58
4.3.4	Reómetro magnético de esfera levitada.....	59
4.3.5	Reómetro de extrusión de plato deslizante.....	60
4.3.6	Reómetro extensional.....	60
4.4	Decisión.....	61
4.5	Tabla resumen.....	62

CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL REÓMETRO

5.1	Introducción.....	66
5.2	Definición del reómetro.....	68
5.2.1	Descripción del equipo.....	68
5.2.2	Descripción de la instrumentación.....	73
5.3	Definición del sistema oleohidráulico.....	77
5.3.1	Cálculos básicos.....	78
5.3.2	Modo básico de funcionamiento.....	83

CAPÍTULO 6. MEDIDA DE LA VISCOSIDAD CON EL REÓMETRO

6.1 Medida de la viscosidad con el reómetro.....	85
6.1.1 Procedimiento de utilización del reómetro.....	85
6.1.2 Procedimiento de cálculo de los parámetros reológicos.....	88
6.1.2.1 Correcciones.....	89
6.1.2.1.1 Corrección para las pérdidas en la Contracción.	89
6.1.2.1.2 Corrección por comportamiento no lineal....	90
6.1.2.1.3 Corrección por deslizamiento.....	91
6.1.2.1.4 Medidas extensionales.....	91

PLANOS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXO I: Glosario de términos	98
ANEXO II: Mejoras aplicables al reómetro.....	109
ANEXO III: Especificaciones técnicas de los sensores.....	113



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

I.T.I. Especialidad Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Diseño mecánico de un equipo para medida de la
viscosidad en fluidos no newtonianos

Cartagena, Febrero de 2009
Alumno: Simón González Roldán
Directores: Ruth Herrero Martín
José Pérez García



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La empresa General Dynamic Santa Bárbara Sistemas ha mostrado interés en colaborar con el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos para optimizar su proceso de producción. Una de las líneas de interés de la empresa es el diseño y desarrollo de un sistema o equipo de ensayo y control de calidad que permita determinar la duración óptima de la fase de amasado del producto, antes de ser llevado a la prensa de extrusión.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general del Proyecto Final de Carrera es diseñar un equipo que permita caracterizar experimentalmente el comportamiento reológico de un fluido No-Newtoniano de tipo visco-elástico de elevado esfuerzo cortante umbral.

Los objetivos parciales que permitirán alcanzar el objetivo global son:

- Definición del tipo de reómetro más adecuado y de los parámetros de diseño del equipo. Presión de trabajo, velocidad de extrusión y capacidad del sistema
- Dimensionado mecánico del equipo
- Diseño del sistema oleohidráulico de accionamiento
- Simulación del sistema mediante Automation Studio
- Instrumentación necesaria para correlacionar los parámetros de funcionamiento con las propiedades reológicas de la sustancia estudiada

1.3 RESUMEN

En los fluidos no newtonianos de tipo visco-elástico tiene gran influencia la viscosidad extensional, lo que genera una problemática en la medida de esta viscosidad. Las deformaciones elongacionales o extensionales juegan un papel importante en procesos en

los que se tiene un flujo a través de geometrías convergentes o divergentes La información disponible acerca de las propiedades extensionales de fluidos complejos es escasa, debido a la dificultad de imponer una deformación puramente extensional.

Existen reómetros de gran exactitud que permiten caracterizar experimentalmente de forma detallada el comportamiento reológico de una gran cantidad de fluidos No-Newtonianos. El SAIT de la UPCT posee un reómetro de altas prestaciones y existen también normas que detallan como obtener las características de mayor interés en ciertos fluidos, como por ejemplo la norma ISO 1133 que especifica el equipo y el método a seguir para determinar el Índice de Fluidéz de materiales termoplásticos. Sin embargo, existen otro tipo de sustancias que no pueden ser caracterizadas mediante estos instrumentos, bien porque presentan deslizamiento o bien porque la presión requerida para que fluyan es muy elevada. Éste es el caso del producto final de la empresa General Dynamic Santa Bárbara Sistemas.

Desde este punto de partida en este proyecto se plantea el diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos. Como punto de partida se parte de trabajos previos realizados por otros investigadores como Ascanio et al (2002), quienes describen un viscosímetro de orificio utilizado para medir las propiedades extensionales de fluidos reológicamente complejos sometidos a elevados esfuerzos de cortadura. El principio de operación del medidor está basado en la medida de la caída de presión que se produce en el flujo a través de un orificio y fue calibrado representando la caída de presión adimensional (número de Euler) en función del caudal (número de Reynolds) para diferentes fluidos newtonianos. Estas curvas de calibración las utilizaron posteriormente para determinar la viscosidad aparente extensional de otros fluidos no newtonianos, comparándola con la viscosidad de cizalla mediante el número de Trouton.

1.4 FASES DEL PROYECTO

1. Revisión bibliográfica. Propiedades y tipos de fluidos No-Newtonianos
2. Tipos de reómetros comerciales. Diseños y patentes para aplicaciones especiales
3. Caracterización reológica y propiedades termofluidas a determinar

4. Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos. Parámetros de diseño
5. Diseño y simulación del sistema oleohidráulico de control
6. Conclusiones



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

**CAPÍTULO 2. HISTORIA Y CONCEPTOS
BÁSICOS DE LA REOLOGÍA**

2.1 REOLOGÍA

2.1.1 Definición

La Reología es una disciplina científica que se dedica al estudio de la deformación y flujo de la materia o, más precisamente, de los fluidos. La palabra reología proviene del griego *ρειν* la cual significa fluir. A pesar de que la Reología pudiera cubrir todo lo que tiene que ver con los comportamientos de flujos en aeronáutica, mecánica de fluidos e inclusive la mecánica de sólidos, el objetivo de la Reología está restringido a la observación del comportamiento de materiales sometidos a deformaciones muy sencillas. Por medio de la observación y del conocimiento del campo de deformación aplicado, el reólogo puede en muchos casos desarrollar una relación constitutiva o modelo matemático que permite obtener, en principio, las funciones materiales o propiedades que caracterizan el material. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes, entre otras.

2.1.2 Historia de la Reología

En 1678 Robert Hooke fue el primero que habló de la reología en su libro “Verdadera teoría de la Elasticidad”. Dicha teoría se resumía en lo siguiente: “Si se duplica la tensión, se duplica la deformación para materiales en estado sólido”.

Nueve años después, Isaac Newton publicó en “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” una hipótesis asociada al estado simple de cizalladura (o corte): “La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas de otras dentro de él”. Este deslizamiento es lo que ahora se denomina “Viscosidad dinámica o molecular”, sinónimo de fricción interna. Dicha viscosidad es una medida de la resistencia a fluir.

La fuerza por unidad de área que se requiere para el movimiento de un fluido se define como F/A y se denota como “ τ ” (tensión o esfuerzo de cizalla). Según Newton la

tensión de cizalla o esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad (du/dy), o también denominado como $\dot{\gamma}$ o D . Si se duplica la fuerza, se duplica el gradiente de velocidad de deformación:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \dot{\gamma} = \mu D \quad (2.1)$$

Esta fórmula se denomina *Ley de Newton*, y a los fluidos que fielmente presentan este comportamiento, se les denomina Newtonianos. La glicerina y el agua son ejemplos característicos de fluidos Newtonianos. Para la glicerina, por ejemplo, la viscosidad vale 1000 mPa·s aproximadamente, en cambio para el agua la viscosidad vale 1 mPa·s, es decir, es mil veces menos viscosa que la glicerina.

En esta época apareció la Ley de Hooke que fue de aplicación para el estudio de la reología de sustancias sólidas,

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.2)$$

siendo, τ , el esfuerzo cortante (Pa), G , el módulo de rigidez (Pa) y γ , la deformación (%).

De esta fórmula se deduce que si se aplica un esfuerzo cortante τ sobre un cuerpo sólido, éste va a sufrir una cierta deformación γ . El valor de dicha deformación se mantendrá hasta que cese el esfuerzo aplicado, si no se supera su límite elástico.

Hace 300 años los estudios relacionados con la Reología se reducían a aplicar la Ley de Newton para líquidos y la Ley de Hooke para sólidos. Fue a partir del siglo XIX cuando los científicos comenzaron a tener dudas acerca de la validez universal de estas leyes lineales.

En 1835 W. Weber llevó a cabo una serie de experimentos con gusanos de seda y observó que no eran perfectamente elásticos. Lo que dedujo fue que una carga longitudinal producía una extensión inmediata, seguida de un posterior alargamiento conforme

transcurría el tiempo. Al eliminar la carga se producía una contracción inmediata, seguida de una contracción gradual de la longitud hasta llegar a la inicial. Estas características se asocian a la respuesta de un líquido.

En 1867 J.C Maxwell, en su artículo “Sobre la teoría dinámica de los gases”, incluido en la Enciclopedia Británica, propuso un modelo matemático para describir los fluidos que poseen propiedades elásticas

$$\tau = \beta \cdot \gamma \quad (2.3)$$

donde β es un parámetro semejante al módulo de rigidez (Parámetro no-nulo).

Tanto la conducta que observó Weber en sólidos, como Maxwell en líquidos se denominó posteriormente “Viscoelasticidad”. Después de Maxwell no se profundizó más en el estudio hasta la segunda década del siglo XX, apareciendo una serie de modelos lineales (flujo plástico y punto de fluidez) y no lineales de comportamiento.

A partir de la Segunda Guerra Mundial, la Reología cobró mucha fuerza con la búsqueda de materiales viscoelásticos para lanzallamas. Aparecieron poco a poco más modelos y se observó que la viscosidad también dependía del tiempo (Tixotropía y Reopexia). Además, se profundizó en el hecho de que los materiales reales pueden presentar comportamiento viscoso, elástico o viscoelástico (combinación de ambos).

En 1945 M. Reiner definió el número de Deborah, (De) como:

$$De = \frac{\tau_c}{T} \quad (2.4)$$

donde, “ τ_c ” es el tiempo característico del material, que caracteriza la fluidez intrínseca de un material, “T” el tiempo característico del proceso de deformación. Si el número de Deborah es muy alto se considera al material como un sólido elástico, y si es muy bajo se le considera como un líquido viscoso.

A partir de ese año, el interés por la reología fue aumentando con la aparición de las fibras sintéticas, plásticos, detergentes, aceites multigrado, pinturas y adhesivos entre otros, estudiándose para ello suspensiones newtonianas tanto diluidas como concentradas.

La reología ha sido muy importante y lo seguirá siendo para el desarrollo de múltiples industrias, es relevante enunciar sus **aplicaciones** mas características:

- Industria alimentaria
 - a) Control de calidad de los alimentos: Se realiza en la propia línea de producción. Es determinante para la aceptación de productos como patatas fritas, cereales, quesos, aperitivos, yogures, dulces, chocolates, cremas, etc.
 - b) Estudio de la textura y consistencia de productos alimenticios: dichas propiedades son muy importantes a la hora de que un producto sea del agrado del consumidor.
- Producción de pegamentos: el estudio de su plasticidad, de la forma de fluir dentro del recipiente que lo contiene, etc.
- Producción de pinturas: una pintura debe ser esparcida de forma fácil pero sin que escurra.
- Producción de productos cosméticos y de higiene corporal: la duración de una laca sobre el pelo, la distribución de la pasta de dientes por toda la boca, la forma de cómo se esparce una crema, etc. Todas estas características se estudian con la reología para obtener la mayor eficacia del producto.
- Producción de medicamentos: se estudia su estabilidad química, su tiempo de caducidad y su facilidad de extrusión, entre otras.
- Caracterización de elastómeros y de polímeros tipo PVC.
- Estabilidad de emulsiones y suspensiones.
- Caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos.
- Caracterización de metales (en situaciones de elevada temperatura), y de cristales líquidos.
- Control de sustancias que sean transportadas a lo largo de un recipiente cilíndrico (para evitar la reopexia).

- Estudio del magma en vulcanología: cuanto más fluido sea el magma más tendencia va a tener el volcán a que provoque una erupción.
- Industria armamentística: estudio de las características y cualidades de la producción de pólvora.

2.2 Viscosidad

2.2.1 Definición

La *viscosidad dinámica o molecular*, μ , se puede definir como una medida de la resistencia a fluir de un fluido. Dicho concepto se introdujo anteriormente en la Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad).

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

siendo, μ , es la viscosidad dinámica (Pa·s), τ , es el esfuerzo cortante o de cizalla (Pa). $\dot{\gamma}$, velocidad de deformación (s^{-1})(También se denomina D)

Sea un cuerpo en forma de paralelepípedo de base S y de altura h .

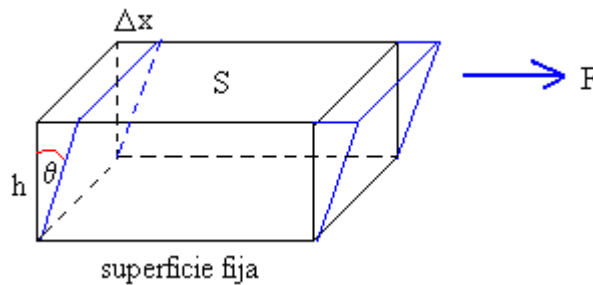


Figura 2.1. Esfuerzo de cizalla.

Cuando la fuerza F que actúa sobre el cuerpo es paralela a una de las caras mientras que la otra cara permanece fija, se presenta un tipo de deformación denominada de cizallamiento, en el que no hay cambio de volumen pero si de forma. Si originalmente la sección transversal del cuerpo tiene forma rectangular, bajo un esfuerzo cortante se convierte en un paralelogramo.

Definimos el esfuerzo (τ) como F/S la razón entre la fuerza tangencial y el área S de la cara sobre la que se aplica. La deformación por cizalla, se define como el cociente $\Delta x/h$, donde Δx es la distancia horizontal que se desplaza la cara sobre la que se aplica la fuerza y h , la altura del cuerpo, tal como vemos en la figura 2.1.

Al *esfuerzo de cizalla* τ se le suele llamar: Tensión tangencial, Tension de cizalla, Tensión de corte, Fuerza superficial, Shear Stress (en inglés). Es uno de los parámetros más importantes y fundamental para el cálculo de la viscosidad en el reómetro.

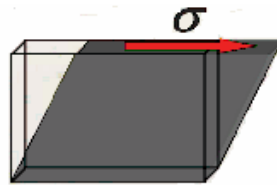


Figura 2.2. Esfuerzo de cizalla

La *velocidad de cizalla* nos aporta la velocidad de variación de la deformación, también se llama velocidad de deformación y la definimos matemáticamente de la siguiente forma:

$$\frac{d\gamma}{dt} \equiv \dot{\gamma} \equiv D = \frac{du}{dy} = (s^{-1}) \quad (5.2)$$

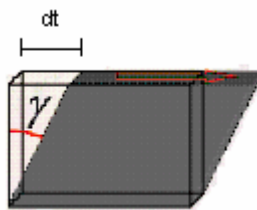


Figura 2.3. Velocidad de deformación

La viscosidad es un término de gran relevancia en el presente estudio ya que será su valor el que nos aporte la información suficiente para anticipar la calidad del producto que se pretende medir. Para conocer, por tanto, este parámetro reológico, es necesario diseñar un instrumento capaz de medir con exactitud los términos de los que depende la viscosidad.

2.2.2 Tipos de viscosidad

Existen cuatro tipos de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente.

La viscosidad dinámica o absoluta, denominada “ μ ” se ha visto anteriormente.

Existe otro término de viscosidad denominada *viscosidad cinemática*, “ ν ”, que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado.

En cambio, *la viscosidad aparente* “ η ” se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para fluidos de comportamiento no lineal. Este término es el que se utiliza al hablar de “viscosidad” para fluidos no newtonianos. Si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define también como la *pendiente* en cada punto de dicha curva.

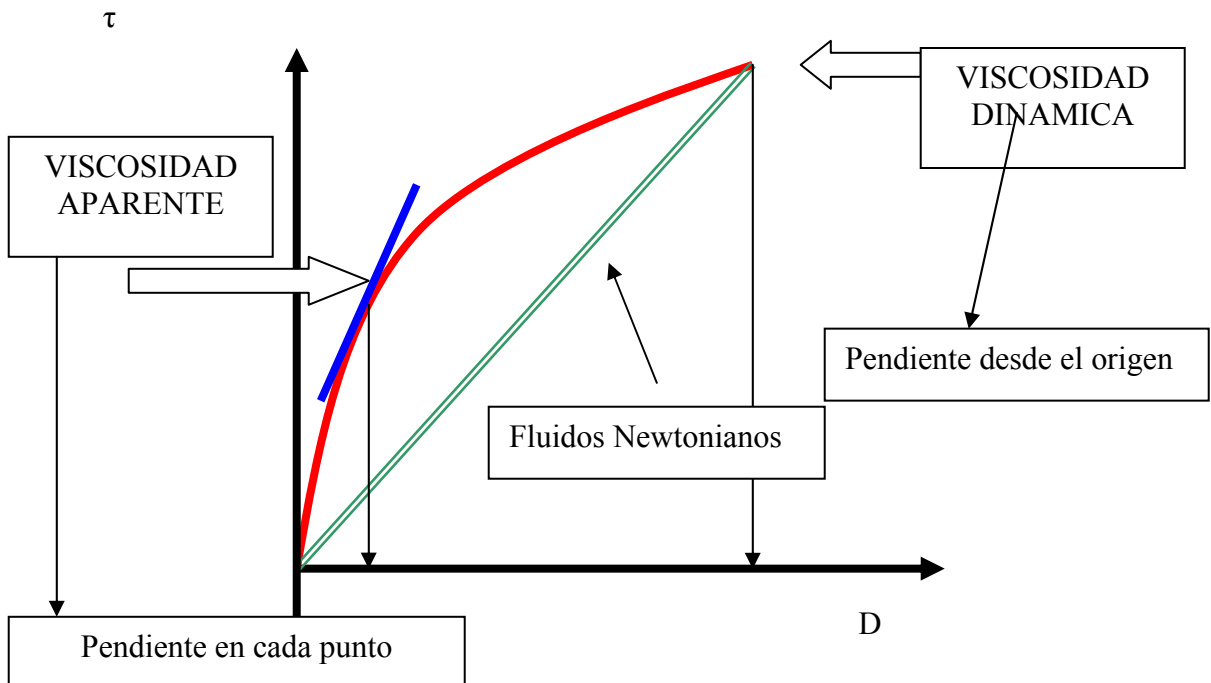


Figura 2.4: Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente.

Por último, existe otro tipo de viscosidad importante que puede evaluar características relevantes de un material, es la denominada *viscosidad extensional*, μ_e : La viscosidad extensional se define como la viscosidad que presenta un fluido no newtoniano cuando se aplica un esfuerzo de tracción sobre él. Presenta la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación en el eje que se produzca (axial ó biaxial).

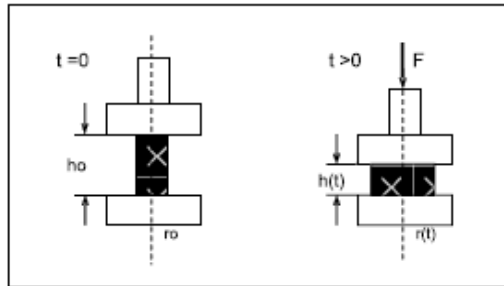


Figura 2.5. Prueba de flujo extensional biaxial con velocidad constante del plato y deformación controlada

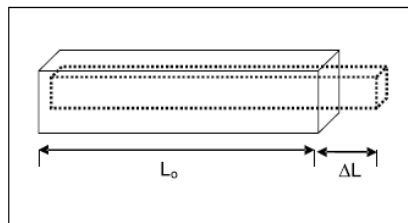


Figura 2.6. Extensión lineal de una barra rectangular

La relación entre la viscosidad dinámica y la extensional se denomina *número de Trouton* y para los fluidos Newtonianos tiene un valor de 3.

$$\mu_e = 3\mu \quad (2.6)$$

2.3 UNIDADES

Las unidades de viscosidad dinámica más utilizadas son los *Pascales* y *miliPascales por segundo* (Pa·s) y (mPa·s). Se debe tener en cuenta que $1000 \text{ mPa}\cdot\text{s} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Además, el sistema cegesimal aún se sigue usando, siendo la unidad de medida el *centiPoise* (cP). La conversión de unidades entre los dos sistemas es: $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ y $1 \text{ Poise} = 1 \text{ gr/cm}\cdot\text{s}$. En

la Tabla 2.1 se presentan los valores de viscosidad para sustancias típicas a temperatura y presión ambiente;

Fluidos	Viscosidad aproximada (mPa·s)
Vidrio Fundido	10^{15}
Betún	10^{11}
Polímeros fundidos	10^6
Miel líquida	10^4
Glicerina	10^3
Aceite de oliva	10^2
Agua	10^0
Aire	10^{-2}

Tabla 2.1. Valores de viscosidad de diversas sustancias.

Unidades de la viscosidad:

$$\mu = \frac{\tau}{\left(\frac{du}{dy}\right)} = [ML^{-1}T^{-1}] = \frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{1}{s}} = \frac{Ns}{m^2} = \frac{kg \frac{m}{s^2} s}{m^2} = \frac{kg}{ms} = Pa \cdot s = cP \quad (2.7)$$

Viscosidad cinemática:

$$\nu = \mu/\rho = \frac{\frac{kg}{ms}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{m^2}{s} \quad (2.8)$$

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ stoke (St)} = 10^6 \text{ centistokes (cSt)}$$

2.4 VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA VISCOSIDAD

Las variables más importantes que afectan a la viscosidad son:

- a) *Velocidad de formación*
- b) *Temperatura*
- c) *Presión*

2.4.1 Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación

Dicha variación es importante en la clasificación de los diferentes tipos de fluidos que se pueden encontrar desde el punto de vista reológico. La siguiente tabla muestra el rango de gradientes de velocidad de diversos procesos muy conocidos y sus aplicaciones.

Tipo de proceso	Rango típico de gradiente de velocidad (s^{-1})	Aplicaciones
Sedimentación de partículas finas sobre un líquido	$10^{-6} \div 10^{-4}$	Medicinas, pinturas
Nivelación debido a tensión superficial	$10^{-2} \div 10^{-1}$	Pinturas, tintas de impresión
Escurreo bajo gravedad	$10^{-1} \div 10^1$	Dar mano de pintura, blanquear lavabos
Extrusión	$10^0 \div 10^2$	Polímeros
Amasado	$10^1 \div 10^2$	Alimentos
Mezclado y agitado	$10^1 \div 10^3$	Líquidos
Flujo en tuberías	$10^0 \div 10^3$	Bombeado

Pulverizado y Pintado	10^3-10^4	Secado en spray, pintura
Fricción	$10^4 \div 10^5$	Cremas y lociones para piel
Lubricación	$10^3 \div 10^7$	Motores de gasolina

Tabla 2.2: Gradientes de velocidad de distintos procesos

2.4.2 Variación de la viscosidad con la temperatura

Líquidos

La viscosidad disminuye con la temperatura. Existen varias fórmulas que permiten evaluar la variación de la viscosidad de un líquido al cambiar la temperatura. Las más importantes son:

- La ecuación de Arrhenius

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (2.9)$$

siendo, μ , la viscosidad dinámica (Pa·s), T, es la temperatura absoluta (K) y A y B son constantes dependientes del líquido

Como se deduce de la ecuación, la viscosidad disminuye con la temperatura. Esto es debido al hecho de que, conforme aumenta la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética, dando lugar a una disminución de la viscosidad, efecto que ha de tenerse en cuenta para una determinación rigurosa de la misma. En la medición, la temperatura debe permanecer prácticamente constante.

- La ecuación de Poiseuille (1840)

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} \quad (2.10)$$

donde, μ_0 , la viscosidad dinámica a 0 ° C, T, la temperatura (°C) y α y β : coeficientes constantes.

Gases

En cuanto a los gases, hay que decir que cuanto mayor es la temperatura, mayor es la agitación y los choques de las moléculas del gas, oponiéndose al movimiento (mayor fricción) y produciendo un aumento de la viscosidad del gas.

2.4.3 Variación de la viscosidad con la presión

La viscosidad en líquidos aumenta exponencialmente con la presión. Excepcionalmente, para el agua a temperaturas menores de 30° C la viscosidad disminuye. Los cambios de viscosidad con la presión son bastante pequeños para presiones distintas de la atmosférica. Para la mayoría de los casos prácticos, el efecto de la presión se ignora a la hora de hacer mediciones con el viscosímetro o reómetro aunque en el presente estudio necesitaremos un valor de presión preciso para la medida de la viscosidad del producto de la empresa, por su importancia en el resultado de esta.

Existe una ecuación que permite tener en cuenta ambas variables (temperatura y presión), se denomina ecuación de *Barus*:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{[AP-B/T-T_0]} \quad (2.11)$$

En esta expresión, μ_0 , es la viscosidad a T_0 y a presión atmosférica y A y B para aceites lubricantes en general tienen un valor constante de: A: 1/430 y B: 1/36

2.5 ÍNDICE DE VISCOSIDAD (I.V.)

Se ha observado que la viscosidad de un fluido varía de forma apreciable con la temperatura. Esta variación puede volverse muy crítica en algunas aplicaciones, en las que la variación de la viscosidad puede inducir fricciones, agarrotamientos o variaciones de la velocidad. Es de especial relevancia en aceites lubricantes y en fluidos hidráulicos.

Para poder valorar estos cambios se define el *índice de viscosidad* (I.V.) que ofrece una medida de la variación de la viscosidad del fluido con la temperatura.

I.V. ALTOS: Fluidos que muestran un cambio pequeño de viscosidad respecto a la temperatura.

I.V. BAJOS: Fluidos que muestran un cambio grande de viscosidad respecto a la temperatura.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

I.T.I. ESP. MECÁNICA

CAPÍTULO 3. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Un fluido se puede definir como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de un esfuerzo cortante por pequeño que este sea. Las características reológicas de un fluido es uno de los criterios esenciales en el desarrollo de productos en el ámbito industrial. Frecuentemente, éstas determinan las propiedades funcionales de algunas sustancias e intervienen durante el control de calidad, los tratamientos (comportamiento mecánico), el diseño de operaciones básicas como bombeo, mezclado y envasado, almacenamiento y estabilidad física, e incluso en el momento del consumo (textura).

Las propiedades reológicas se definen a partir de la relación existente entre fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta, ya sea como deformación o flujo. Todo fluido se va a deformar en mayor o menor medida al someterse a un sistema de fuerzas externas. Dicho sistema se representa matemáticamente mediante el esfuerzo cortante “ τ ”, mientras que la respuesta dinámica del fluido se cuantifica mediante la velocidad de deformación “D” o $\dot{\gamma}$.

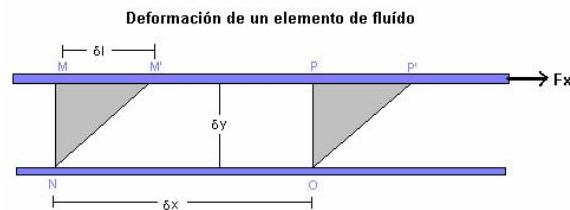


Figura 3.1. Detalle del movimiento del fluido.

3.2 TIPOS DE FLUIDOS:

Existen 3 tipos de fluidos:

- NEWTONIANOS. Existe proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.
- NO NEWTONIANOS. No hay proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación o se requiere un esfuerzo inicial para que comience a fluir denominado esfuerzo umbral, τ_0 .

- VISCOELÁSTICOS. Se comportan como líquidos y sólidos, presentando propiedades de ambos.

La relación entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación viene dada por la ecuación vista anteriormente (ecuación 2.1):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{(Ley de viscosidad de Newton)} \quad (3.1)$$

Un esquema con los tipos de fluidos existentes en Reología es el siguiente:

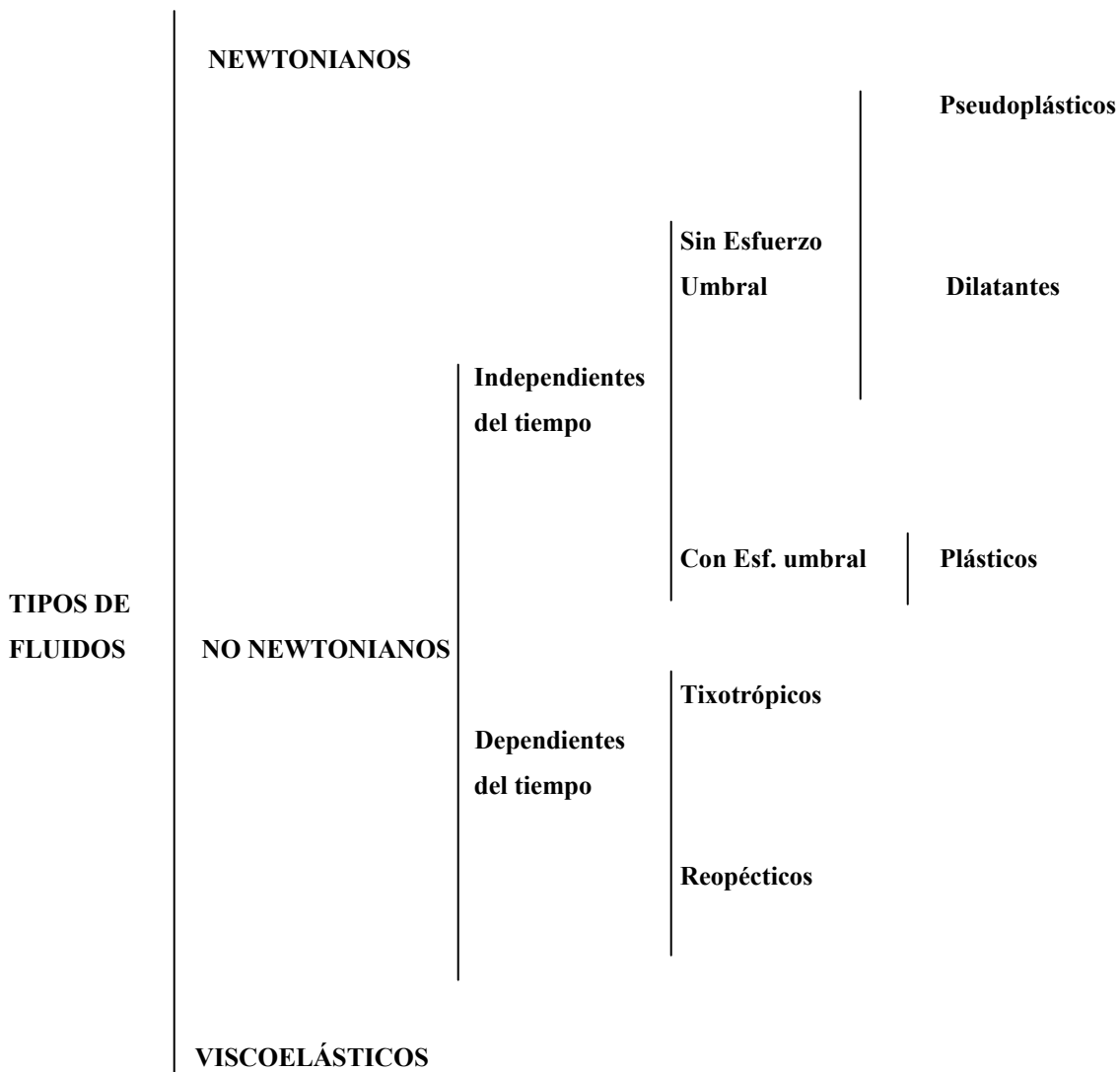


Figura 3.2. Tipos de fluidos

A continuación se describe detalladamente cada uno de ellos:

3.2.1 FLUIDOS NEWTONIANOS

Un fluido newtoniano se caracteriza por cumplir la Ley de Newton, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación Eq. (3.1), debido a que el término la viscosidad dinámica μ es constante para este tipo de fluidos y no depende del esfuerzo cortante aplicado. Hay que tener en cuenta también que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

Para una mejor comprensión de este tipo de fluido se representan dos tipos de gráficas, la “*Curva de Fluidez*” y la “*Curva de Viscosidad*”. En la curva de fluidez se muestra el esfuerzo cortante frente a la velocidad de deformación, mientras que en la curva de viscosidad se representa la viscosidad en función de la velocidad de deformación. Para un fluido newtoniano estas curvas tienen la forma típica indicada en la Figura 3.3.

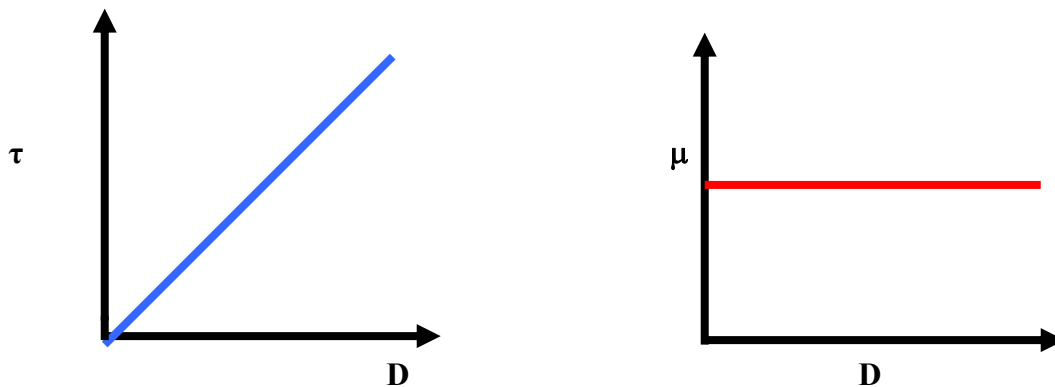


Figura 3.3: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano.

Como se puede observar en la curva de fluidez, el valor de la viscosidad μ es la tangente al ángulo que forman el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación, que es constante para cualquier valor aplicado. Además se observa en la curva de viscosidad que la viscosidad es constante para cualquier velocidad de deformación aplicada.

Ejemplos de este tipo de fluidos son el agua, el aceite.

3.2.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Los fluidos no newtonianos son aquellos en los que la relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. Estos fluidos a su vez se diferencian en *dependientes e independientes del tiempo*.

3.2.2.1 FLUIDOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO DE APLICACIÓN DEL ESFUERZO DE CORTADURA

Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no esfuerzo umbral, es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

1. Fluidos sin esfuerzo umbral

3.2.2.1.1 FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS. (SHEAR-THINNING)

Este tipo de fluidos se caracterizan por una disminución de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de deformación. Su comportamiento típico se representa en la Figura 3.4.

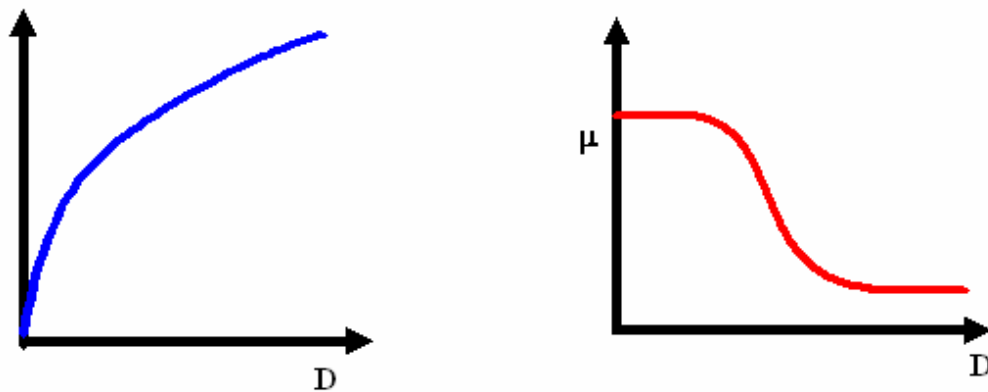


Figura 3.4: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido pseudo-plástico.

Se pueden dar dos explicaciones a este comportamiento de manera simplificada, dada su complejidad, ya que el flujo que se forma es bastante complejo:

a) FLUJO DE VARILLAS RÍGIDAS SUSPENDIDAS EN UN LÍQUIDO NEWTONIANO :

Este modelo consiste en suponer que existen una serie de varillas desorientadas dentro del líquido newtoniano. Cada varilla, caracterizada por su movimiento browniano (propuesto por Brown en 1827), tiene un vector de velocidad que tiende a adoptar una situación horizontal. Dicho movimiento browniano es una observación indirecta de la agitación térmica de las moléculas de un líquido, al visualizarse el desplazamiento de partículas en suspensión en el seno del mismo.

La resultante de los choques al azar es una fuerza de magnitud y dirección variable según la orientación de las varillas. Cuanto mayor sea la orientación de las varillas, menor será la viscosidad del fluido.

b) FLUJO DE MOLÉCULAS FILAMENTARIAS EN UN LÍQUIDO NEWTONIANO

En este modelo se supone que, dentro del fluido newtoniano situado entre dos placas paralelas, una de las cuales se mueve, aparecen una serie de macromoléculas en forma de filamentos porosos que contienen grupos de átomos con una gran movilidad.

Al principio estos grupos de átomos forman filamentos bastante enredados. Con el tiempo, al moverse la placa superior, la velocidad de deformación aumenta y la resultante de las fuerzas tiende a desenredar estos filamentos en la dirección del flujo, dependiendo de su elasticidad y de su velocidad de deformación, y además dicha fuerza libera parte del líquido que existe alrededor de la molécula.

Como resultado de todo lo que ocurre en el seno del fluido se produce una disminución de la fricción interna dando lugar a su vez a una disminución de la viscosidad (Figura 3.5).

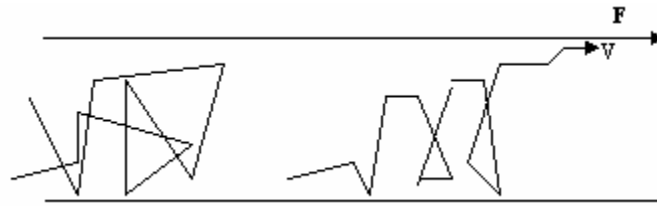


Figura 3.5: Modelo de filamentos.

Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: algunos tipos de ketchup, mostaza, algunas clases de pinturas, suspensiones acuosas de arcilla, etc. La *formulación matemática* de un fluido pseudoplástico es bastante compleja:

1) Ley potencial (Ostwald) :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n = K \left| \dot{\gamma} \right|^{n-1} \dot{\gamma} \quad (3.2)$$

siendo, τ , es el esfuerzo cortante (mPa), $\dot{\gamma}$, la velocidad de deformación (s^{-1}), K, constante cuyas dimensiones dependen del valor de n (*viscosidad aparente*) y n , valor entero menor que uno.

Se puede calcular el valor de “n” representando la ecuación en escala doble-logarítmica:

$$\ln \tau = \ln K \dot{\gamma}^n = \ln K + n \ln \dot{\gamma} \quad (3.3)$$

Ecuación de la recta:

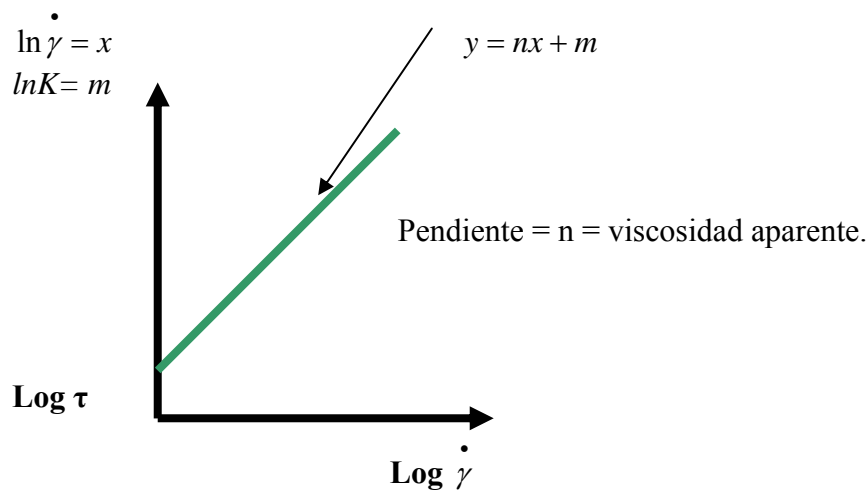


Figura 3.6. Representación gráfica $\log \tau$ vs $\log \dot{\gamma}$.

La ordenada en el origen que se obtiene representa el valor de K.

La segunda forma de la ecuación proporciona el valor en módulo para movimientos mas complejos:

2) Series de potencia (Steiger, Ory):

$$\tau = a\dot{\gamma}^3 + c\dot{\gamma} \quad (3.4)$$

siendo, τ , el esfuerzo cortante (Pa), $\dot{\gamma}$, velocidad de deformación (s^{-1}) y a, c, son factores de dimensiones (s^{-1} , s^{-3} , s^{-5})

3.2.2.1.2 FLUIDOS DILATANTES. (SHEAR-THICKENING)

Los fluidos dilatantes son suspensiones en las que se produce un aumento de la viscosidad con la velocidad de deformación, es decir, un aumento del esfuerzo cortante con dicha velocidad. La figura 3.8 representa las curvas de fluidez y viscosidad para este tipo de fluidos.

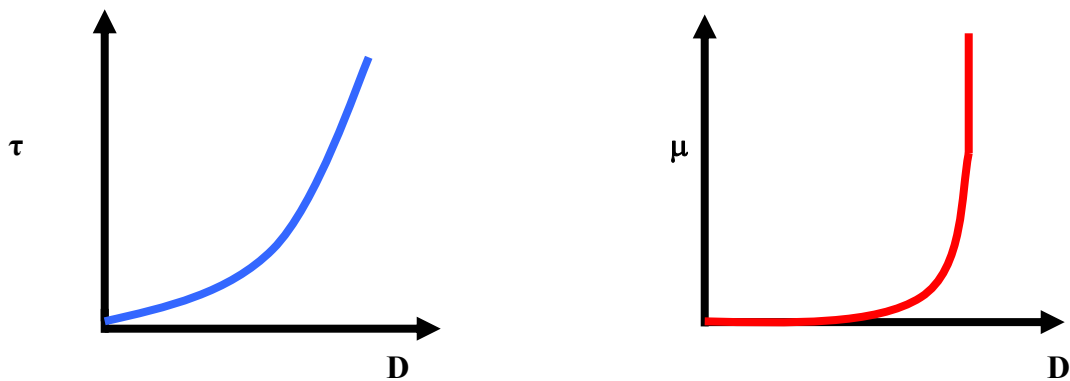


Figura 3.7: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido dilatante.

El fenómeno de dilatación se produce debido a la fase dispersa del fluido. En dicho fluido tiene lugar un empaquetamiento de las partículas, dejando a la fase continua casi sin espacio. Si a continuación se aplica un esfuerzo, el empaquetamiento se altera y los huecos

entre las partículas dispersas aumentan. Además, conforme aumenta la velocidad de deformación aplicada, mayor turbulencia aparece y más difícil es el movimiento de la fase continua por los huecos, dando lugar a un mayor esfuerzo cortante (la viscosidad aumenta).

Ejemplos de este tipo de fluidos son: las disoluciones de harina de maíz, las disoluciones de almidón muy concentradas, la arena mojada, dióxido de titanio, etc.

El modelo que describe un comportamiento dilatante es la ley potencial vista anteriormente en el caso de fluidos pseudoplásticos Eq. (3.11), cambiando únicamente el valor de n , que debe ser mayor que la unidad ($n > 1$).

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n = K |\dot{\gamma}|^{n-1} \cdot \dot{\gamma} \quad (3.5)$$

2. Fluidos con esfuerzo umbral (plásticos)

3.2.2.1.3 FLUIDOS PLASTICOS

Este tipo de fluidos se comportan como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo umbral) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido. Las curvas de fluidez y viscosidad se representan en la figura 3.8.

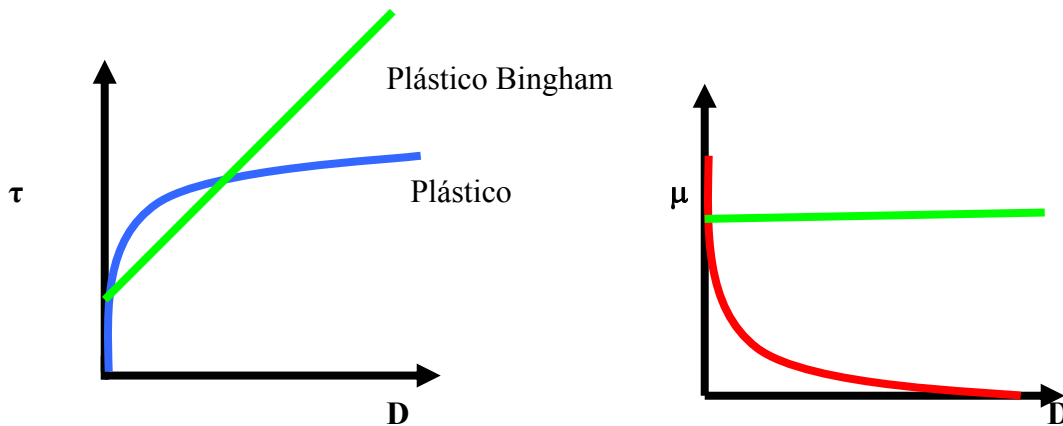


Figura 3.8. Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido plástico

La razón por la que se comportan así los fluidos plásticos es la gran interacción existente entre las partículas suspendidas en su interior, formando una capa llamada “solvatación”. Están formados por dos fases, con una fase dispersa formada por sólidos y

burbujas distribuidos en una fase continua. En estos fluidos, las fuerzas de Van der Waals y los puentes de hidrógeno, producen una atracción mutua entre partículas. También aparecen fuerzas de repulsión debidas a potenciales de la misma polaridad.

En este tipo de fluidos se forman coloides cuyas fuerzas repulsivas tienden a formar estructuras de tipo gel. Si las partículas son muy pequeñas poseen entonces una gran superficie específica, rodeados de una *capa de adsorción* formada por moléculas de fase continua. Gracias a esta capa, las partículas inmovilizan gran cantidad de fase continua hasta que no se aplican sobre ellas un esfuerzo cortante determinado.

Los fluidos plásticos, a su vez, se diferencian en la existencia de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, a partir de su esfuerzo umbral. Si existe proporcionalidad, se denominan fluidos plásticos de Bingham y si no la hay, se denominan solo plásticos. Algunos *ejemplos* de comportamiento plástico son el chocolate, la arcilla, la mantequilla, la mayonesa, la pasta de dientes (las emulsiones, las espumas, etc.)

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de los fluidos plásticos son dos:

- 1) Ecuación generalizada de *Bingham*. Se aplica a los fluidos plásticos de Bingham:

$$\tau - \tau_0 = \eta |\dot{\gamma}|^{n-1} \cdot \dot{\gamma} \quad (3.6)$$

siendo, τ , el esfuerzo cortante (Pa), τ_0 , el esfuerzo umbral requerido para que el flujo se ponga en movimiento (Pa), η , la viscosidad aparente (Pa·s), $\dot{\gamma}$, velocidad de deformación (s^{-1}) y n , un valor entero

- 2) Ecuación de *Casson*. Se aplica para aquellos fluidos en los que no existe proporcionalidad entre el esfuerzo y la velocidad.

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \mu_c \cdot \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (3.7)$$

Siendo, μ_c , la viscosidad plástica definida por Casson (Pa·s) y $\dot{\gamma}$, velocidad de deformación (s^{-1}).

3.2.2.2 FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO DE APLICACIÓN:

Este tipo de fluidos se clasifican en dos tipos: los fluidos *tixotrópicos*, en los que su viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante, recuperando su estado inicial después de un reposo prolongado, y los fluidos *reopéticos*, en los cuales su viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación de la fuerza y vuelven a su estado anterior tras un tiempo de reposo.

3.2.2.2.1 FLUIDOS TIXOTRÓPICOS

Los fluidos tixotrópicos se caracterizan por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo. Esto produce la rotura de las largas cadenas que forman sus moléculas. Dichos fluidos, una vez aplicado un estado de cizallamiento (esfuerzo cortante), sólo pueden recuperar su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar dicha fuerza debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio. Aparece un fenómeno de *Histéresis* (Figura 3.9).

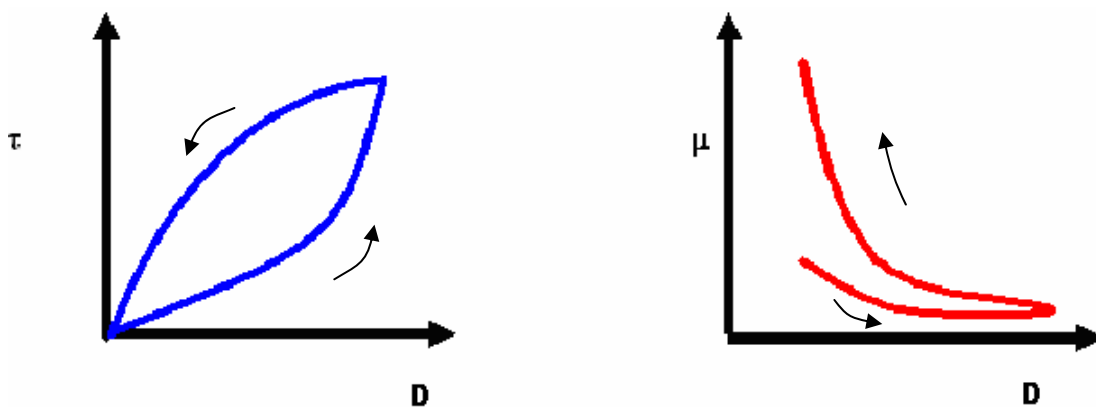


Figura 3.9: Curvas de fluidez y de viscosidad de un fluido tixotropía (hay histéresis)

Las razones de este comportamiento son diversas. Si se considera al fluido como un sistema disperso, se debe tener en cuenta que las partículas que hay en él, poseen diferentes potenciales eléctricos y tienden a formar tres estructuras variadas dependiendo de cómo sea la fase dispersa. Si la fase dispersa está formada por una serie de capas se denomina “Castillo de cartas, *Card House*” (Figura 3.10), si en cambio se compone de una serie de varillas se denomina “Armadura” (Figura 3.11), y si la fase dispersa está compuesta por formas esféricas se denomina “Estructura de perlas encadenadas” (Figura 3.12). Las fuerzas que actúan en estas estructuras son de tipo electrostático y se originan por el intercambio de iones dentro del fluido, el cual provoca atracciones y repulsiones entre ellos que dan lugar a cambios estructurales.

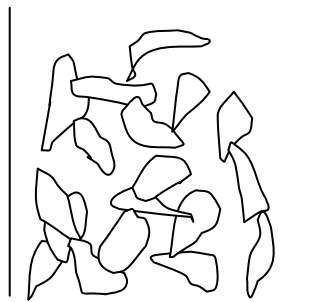


Figura 3.10: Fase dispersa tipo Card House o “Castillo de cartas”

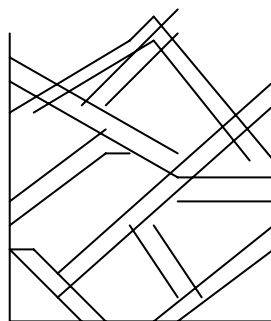


Figura 3.11: Fase dispersa denominada de “Armadura”

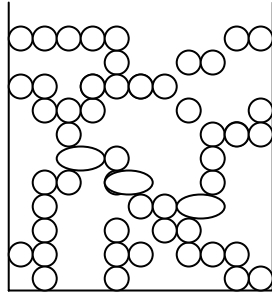


Figura 3.12: “Estructura tipo perlas encadenadas”.

Estos cambios estructurales hacen que disminuya la viscosidad con el aumento de la velocidad de deformación y que ésta esté muy influenciada por el tiempo. La estructura puede volver a recuperar su forma inicial dejándola un tiempo en reposo. Para diferenciar de forma sencilla un fluido tixotrópico, se aumenta la velocidad de deformación hasta un determinado valor y luego se disminuye hasta el reposo, observando entonces un fenómeno de histéresis, que ayuda a comprender la variación de la viscosidad. *Ejemplos* típicos de fluidos tixotrópicos son: las pinturas, el yogur, las tintas de impresión, la salsa de tomate, algunos aceites del petróleo, el nylon, etc. Para modelar la variación de la viscosidad con el tiempo, se utiliza la siguiente ecuación :

$$\mu(t) = \mu_0 - \int_{-\infty}^t M_T(t-t') \frac{df(D^2)}{dt'} dt' \quad (3.8)$$

donde,

$$M_T(t-t') = \int_0^{\infty} \frac{R(II)}{II} \exp\left[-\frac{(t-t')}{II}\right] dII \quad (3.9)$$

siendo, II , el tiempo de relajación del fluido, es decir, el tiempo que tarda el fluido en disminuir su tensión a $1/e$ veces. (Puede haber diversos tiempos de relajación), $R(II)$, es una función de distribución de tiempos de relajación, μ_0 , la viscosidad inicial sin perturbaciones y $F(D^2)$, una función simétrica de la velocidad de deformación.

3.2.2.2 FLUIDOS REOPÉCTICOS

Los fluidos reopécticos, en cambio, se caracterizan por tener un comportamiento opuesto a los tixotrópicos, es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada y presentan una histéresis inversa a estos últimos. Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa ésta, se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad.

Las curvas de fluidez y de viscosidad de los fluidos reopécticos se representan en la figura 3.13:

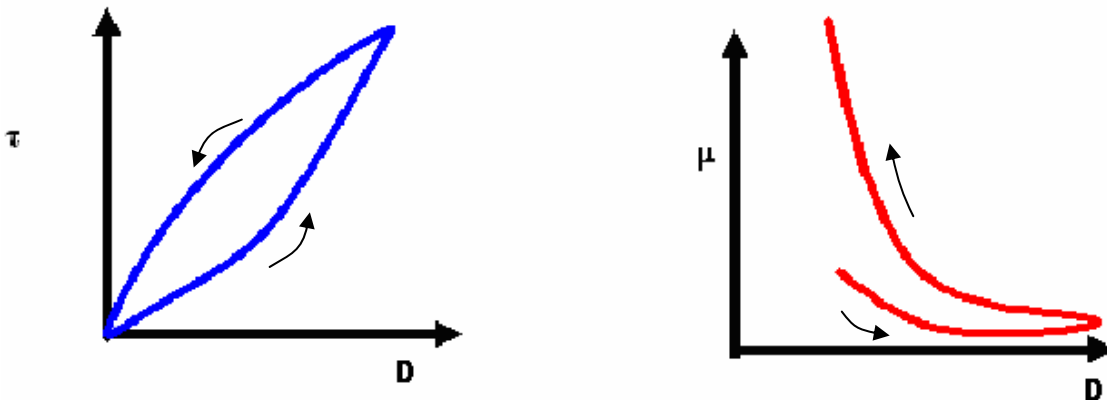


Figura 3.13. Curvas de comportamiento reopéctico (hay histéresis)

Existen pocos fluidos de este tipo. Algunos *ejemplos* son: el yeso y la arcilla bentonítica, entre otros.

3.2.3 FLUIDOS VISCOELÁSTICOS

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos.

La ecuación que describe el comportamiento viscoelástico está basada en el modelo de *Maxwell*:

$$\tau + \lambda \cdot \dot{\tau} = \eta \cdot D \quad (3.10)$$

donde, τ , es el esfuerzo cortante aplicado (Pa), λ , el tiempo de relajación (s), $\dot{\tau}$, el gradiente de esfuerzos cortantes, η , la viscosidad aparente (Pa·s) y D , es la velocidad de deformación.

Éste modelo se puede representar como el modelo mecánico de la siguiente figura:

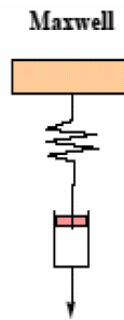


Figura 3.14. Modelo mecánico

Ejemplos de fluidos viscoelásticos son la nata, la gelatina o los helados

3.3 CLASIFICACION DE FLUIDOS EN BASE A MODELOS AVANZADOS

3.3.1 *Modelo de Herschel-Bulkley*, es un caso especial del Modelo de la Ley Potencial donde el esfuerzo cortante está relacionado con el gradiente de velocidades mediante la siguiente expresión

$$\tau = K \left(\frac{dV}{dy} \right)^n + \tau_0 \quad (3.11)$$

donde, K , es el coef. de consistencia del líquido (Pa·s), n , es el índice de la Ley Potencial (valor adimensional) y τ_0 , es la Tensión de Fluencia (Pa) del fluido.

Este modelo incluye los siguientes casos particulares:

- $n = 1, \tau_0 = 0$ describe un fluido Newtoniano, en este caso K es la viscosidad dinámica del líquido ($K = \eta$).
- $n = 1, \tau_0 > 0$ describe el Modelo Lineal de Bingham de líquidos no-Newtonianos caracterizados por una tensión de fluencia no nula (τ_0) por debajo de la cual el líquido se comporta como un sólido, así que para comportarse como un líquido se necesita exceder el umbral del esfuerzo cortante del fluido (este umbral se modela de forma automática tomando para K , aquí llamado viscosidad plástica, un valor muy superior para $\tau < \tau_0$).
- $0 < n < 1, \tau_0 = 0$ describe el Modelo de la Ley Ley Potencial de fluidos no-Newtonianos tipo "shear-thinning".
- $n > 1, \tau_0 = 0$ describe el Modelo de la Ley Potencial de fluidos no-Newtonianos tipo "shear-thickening".

3.3.2 *Modelo de Carreau*, donde el esfuerzo cortante está relacionado con la velocidad de deformación mediante una expresión del tipo,

$$\mu = \mu^\infty + (\mu_0 - \mu^\infty) \cdot \frac{\left[1 + K_1 \cdot \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 \right]^{(n-1)}}{2} \quad (3.13)$$

Donde, μ^∞ , es la viscosidad dinámica del líquido a una tasa de corte infinita, es decir, la viscosidad dinámica mínima (Pa•s), μ_0 , es la viscosidad dinámica del líquido a una tasa de corte nula, es decir, la viscosidad dinámica máxima (Pa•s), K_1 , es la constante de tiempo (s) y "n", es el índice de la Ley Potencial (valor adimensional).

3.4 TABLA RESUMEN DE LOS FLUIDOS NO NEWTONIANOS

TIPO DE FLUIDO	COMPORTAMIENTO	CARACTERISTICAS	
PLÁSTICOS	PLASTICO PERFECTO	LA APLICACIÓN DE UNA DEFORMACION NO CONLLEVA UN ESFUERZO DE RESISTENCIA EN SENTIDO CONTRARIO	METAL SUPERAD
	PLASTICO DE BINGHAM	RELACION LINEAL, O NO LINEAL EN ALGUNOS CASOS, ENTRE EL ESFUERZO CORTANTE Y EL GRADIENTE DE DEFORMACION UNA VEZ SE HA SUPERADO UN DETERMINADO VALOR DEL ESFUERZO CORTANTE	BARRO
	LIMITE PSEUDOPLASTICO	FLUIDOS QUE SE COMPORTAN COMO PSEUDOPLÁSTICOS A PARTIR DE UN DETERMINADO VALOR DEL ESFUERZO CORTANTE	
	LIMITE DILANTE	FLUIDOS QUE SE COMPORTAN COMO DILATANTES A PARATIR DE UN DETERMINADO VALOR DEL ESFUERZO CORTANTE	
FLUIDOS QUE SIGUEN LA LEY DE LA POTENCIA	PSEUDOPLASTICO CORTANTE	LA VISCOSIDAD APARENTE SE REDUCE CON EL GRADIENTE DEL ESFUERZO CORTANTE	AL
	DILATANTE	LA VISCOSIDAD APARENTE SE INCREMENTA CON EL GRADIENTE DEL ESFUERZO CORTANTE	SOLUCION AZÚCAR EN ALMIDÓN
FLUIDOS VISCOELASTICOS	MATERIAL DE MAXWELL	COMBINACIÓN LINEAL "SERIE" DE EFECTOS ELÁSTICOS Y VISCOSOS	METALES, M
	FLUIDO OLDROYD-B	COMBINACIÓN LINEAL DE COMPORTAMIENTO COMO FLUIDO NEWTONIANO Y COMO MATERIAL MAXWELL	BETÚN, MA PLASTILINA
	MATERIAL DE KELVIN	COMBINACIÓN LINEAL "PARALELA" DE EFECTOS ELÁSTICOS Y VISCOSOS	
	PLASTICO	ESTOS MATERIALES SIEMPRE VUELVEN A UN ESTADO DE REPOSO PREDEFINIDO	
FLUIDOS CUYA VISCOSIDAD DEPENDE DEL TIEMPO	REOPÉCTICO	LA VISCOSIDAD APARENTE SE INCREMENTA CON LA DURACIÓN DEL ESFUERZO APLICADO	
	TIXOTRÓPICO	LA VISCOSIDAD APARENTE DECRECE CON LA DURACIÓN DEL ESFUERZO APLICADO	MIELES

Tabla 3.1 Resumen de fluidos no newtonianos.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

**CAPÍTULO 4. TIPOS DE VISCOSÍMETROS Y
REÓMETROS.**

4.1 INTRODUCCIÓN

Para poder abordar el diseño de un reómetro adecuado para cumplir el objetivo fijado en el capítulo 1 es necesario conocer los distintos tipos de reómetros y viscosímetros con el fin de decidir el que mejor se adapta a sus necesidades y a su producto.

Se han utilizado numerosos tipos de reómetros para medir la viscosidad y la tensión de producción de los materiales que es la tensión a la cual el material empieza a fluir. [Tanner, 1985; Ferguson y Kemblowski, 1991; Macosko, 1994]. Un *reómetro* se refiere a un dispositivo que pueda medir la viscosidad y la tensión de producción de un material (esfuerzo umbral) a diferentes velocidades de cizalla, mientras que el *viscosímetro* puede medir solamente la viscosidad a una velocidad de cizalla fija. El reómetro es capaz de generar diferentes velocidades de cizalla con el fin de generar un *reograma*, en cambio, el viscosímetro siempre trabaja con igual velocidad de cizalla.

En este estudio se explica el funcionamiento básico de los viscosímetros y reómetros más utilizados en la actualidad. Por último se propone un cuadro explicativo con los más importantes y para decidir el más acorde para la empresa.

4.2 VISCOSÍMETROS

4.2.1 CLASIFICACIONES

Los viscosímetros se pueden dividir en tres categorías:

- viscosímetros para obtener *viscosidades absolutas*
- viscosímetros para obtener *viscosidades cinemáticas*
- viscosímetros para obtener *viscosidades extensionales*

Los primeros se basan en la resistencia que ofrece el fluido al movimiento cuando una superficie sólida se mueve en su seno. Como ejemplo de estos viscosímetros se tienen los de caída de la esfera, de Codatte-Ratsahek, de Stormer, etc.

Los viscosímetros que determinan viscosidades cinemáticas se basan en el tiempo que requiere un determinado volumen de fluido en pasar libremente a través de un orificio normalizado, por ejemplo, los viscosímetros de Saybolt, Saybolt Furol, Engler, capilar, etc.

El tercer tipo de viscosímetro determina la viscosidad extensional por medio de la información que otorga efectuar un esfuerzo de tracción en el material.

Por último se propone otra clasificación:

- Flujos de Poiseuille, donde las paredes son estacionarias y el flujo es causado por la aplicación de una presión externa al fluido. Éste es el caso de los viscosímetros capilares, donde el líquido es forzado a atravesar un tubo muy estrecho y la viscosidad del líquido se determina a partir del caudal medido, la diferencia de presión aplicada y las dimensiones del tubo.
- Flujos de Couette, donde no existe diferencia de presión, sino que una de las paredes del sistema se mueve de manera que produce el flujo. De hecho, el fluido es arrastrado con la pared debido a la acción de las fuerzas viscosas (flujo de arrastre), que son función de la velocidad. El principio de medida se basa en la determinación simultánea de la velocidad de rotación del elemento rotatorio y el momento resultante de esta rotación. Existen varios tipos de flujos de Couette, que dan lugar a diferentes reómetros rotacionales: flujo entre dos cilindros coaxiales, flujo entre un cono y un plato, flujo entre dos platos (o discos) paralelos.

4.2.2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

4.2.2.1 Viscosímetro de caída de esfera (de Poiseuille)

Este equipo presenta un tubo de vidrio o plástico que se llena con el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y permite obtener la velocidad límite que alcanza la esfera de un material determinado (acero, vidrio, etc.), que se deja caer en su seno. La ecuación de Stokes muestra la viscosidad del fluido en función de la velocidad límite de la esfera,

$$\mu = \frac{2r^2(\rho_s - \rho_L)g}{9U_{\max}} \quad (4.1)$$

siendo, ρ_s , la densidad de la esfera (kg/m^3), ρ_L , la densidad del líquido (kg/m^3), r , radio de la esfera (m), U_{\max} , velocidad límite alcanzada por la esfera (m/s).

Esta ecuación es válida siempre y cuando la esfera caiga en régimen laminar con fuerzas viscosas dominantes y el diámetro de ésta sea pequeño comparado con el diámetro del tubo. Se considera que el ensayo es válido cuando el número de Reynolds sea menor a 0,1,

$$\text{Re} = \frac{\rho_L U_{\max} d}{\mu} \leq 0,1 \quad (4.2)$$

Faxen modifica el resultado obtenido mediante la expresión anterior para tener en cuenta los efectos perturbadores que pueda tener la pared del tubo de la siguiente manera:

$$\mu_F = F\mu_s \quad (4.3)$$

siendo, μ_s , viscosidad según Stokes y μ_F la viscosidad corregida según Faxen

El factor de Faxen (F) está dado por:

$$F = 1 - 2.104 \frac{d}{D} + 2.09 \left(\frac{d}{D} \right)^3 - 0.905 \left(\frac{d}{D} \right)^5 \quad (4.4)$$

siendo, d , el diámetro de la esfera y D el diámetro del tubo (m)

En este equipo se obtiene la viscosidad de un fluido midiendo la velocidad límite de caída de una esfera en el seno del mismo. Esta velocidad se medirá entre los dos aforos del equipo. La densidad de la esfera se deberá determinar con mucha exactitud, por cualquier método conocido. Se harán mediciones con distintas esferas y luego se compararán los resultados.



Figura 4.2. Viscosímetro de caída de bola

4.2.2.2 Viscosímetro de caída de cuerpo

Según se ha definido en el viscosímetro anterior, la viscosidad μ de un líquido newtoniano se

expresa mediante la ecuación (4.1):
$$\mu = \frac{2r^2(\rho_s - \rho_L)g}{9U_{\max}}$$

Una vez que se determine la velocidad terminal para una esfera dada de densidad y radio conocidos, la viscosidad del líquido se puede calcular fácilmente. Para determinar la viscosidad en los viscosímetros de caída de esfera, se necesita el término de la velocidad que alcanza esfera la cual se desplaza por un tubo cilíndrico inclinado un ángulo fijo respecto del horizontal. Para los viscosímetros de caída-cuerpo con un plomo cilíndrico en lugar de una esfera, la ecuación de trabajo para la viscosidad del líquido newtoniano se da de esta manera,

$$\mu = \frac{t(\rho_s - \rho)(r_1^2 g)[(r_2^2 + r_1^2)\ln(r_2/r_1) - (r_2^2 - r_1^2)]}{2L(r_2^2 + r_1^2)} \quad (4.5)$$

donde, μ y ρ son la viscosidad y la densidad del líquido, ρ_s es la densidad del plomo cilíndrico, t es el tiempo al bajar, L es la distancia vertical de la caída, y r_1 y r_2 es radio del cilindro y radio interno del tubo por el que cae, respectivamente (Dindar, 2001).

La relación entre el radio del cilindro y el del tubo se mantiene para ser más grande de 0.93 (Sen y Kiran, 1990). La ecuación se modifica generalmente a una ecuación de trabajo práctica para los viscosímetros de caída de cuerpo,

$$\mu = \frac{K(\rho_s - \rho)}{V_t} \quad (4.6)$$

donde, μ y ρ son de nuevo la viscosidad y la densidad del líquido, ρ_s , es la densidad el plomo, V_t , es la velocidad terminal del plomo y K es la constante de la calibración.

Para obtener la viscosidad μ del líquido, son necesarias la densidad y la velocidad terminal del plomo. Las velocidades terminales se determinan por medios eléctricos donde se estudia la posición del plomo a lo largo del tiempo (Nakamura y Kurosaki, 2005; Dindar y Kiran, 2002a, b; Terasaki et. al., 2001).

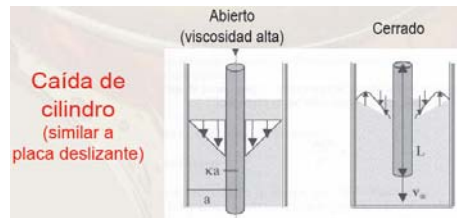


Figura 4.3. Representación de la caída del cilindro

4.2.2.3 Viscosímetro Saybolt

Este equipo consiste en un recipiente (figura 4.4) destinado a contener el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y donde en su parte inferior dispone un orificio de diámetro normalizado. Este recipiente se halla a su vez dentro de otro que le sirve de baño termostático para poder determinar viscosidades a distintas temperaturas. Está dotado de un sistema de calentamiento integrado.

Una clase especial de viscosímetro Saybolt es el denominado de *Saybolt – Furol*, que tiene idénticos principios de funcionamiento pero su orificio tiene un diámetro mayor y sirve para fluidos cuyas viscosidades son altas (desde 480 cP en adelante). La denominación “Furol” proviene de la contracción de las palabras “Fuel and Road Oil”.

En estos dos equipos se mide el tiempo de vaciado de un volumen de muestra a través de un orificio calibrado. El viscosímetro Saybolt Universal sirve para líquidos que tengan entre 32 y 900 segundos de tiempo de vaciado (fuera de esos extremos se observan viscosidades erróneas). Antes de comenzar a trabajar con este equipo debe ser limpiado totalmente con el solvente adecuado y luego secado con una corriente de aire. Además, el orificio debe permanecer libre de obstrucciones. Se deberán realizar mediciones a tres temperaturas diferentes. Para cada temperatura de trabajo, se determinará la densidad del fluido empleado con el objetivo de obtener viscosidades absolutas.



Figura 4.4. Viscosímetro Saybolt

4.2.2.4 Viscosímetro Engler

El principio de funcionamiento de este equipo es igual al de los viscosímetros Saybolt. Las diferencias residen en las formas de los orificios normalizados y en que el viscosímetro Engler requiere un sistema de calentamiento externo.

Como ya fue mencionado, en los viscosímetros de Saybolt y Engler, se determinan viscosidades cinemáticas, que se obtienen midiendo el tiempo de vaciado de un volumen de fluido a través de un orificio normalizado que se recogen en un balón aforado y previamente calibrado. Los resultados de viscosidad cinemática obtenidos se expresan en base al tiempo de descarga en: Segundos Saybolt Universal (SSU) o Segundos Engler Universal (°E).

Estos resultados se pueden relacionar con la viscosidad cinemática en **centistokes (cSt)** mediante la siguiente expresión, en la que θ representa el tiempo de vaciado:

$$\nu = A\theta - \frac{B}{\theta} \quad (4.7)$$

Las constantes A y B para ambos viscosímetros se expresan en la tabla 4.1:

	A	B
Saybolt	0,2200	180,00
Engler	0,5023	91,83

Tabla 4.1. Constantes A y B



Figura 4.5. Viscosímetro de Engler

4.2.2.5 Viscosímetros capilares

Probablemente el primer experimento científico en el que se utilizó un capilar o tubo para medir el flujo fue realizado en 1839 por Hagen, seguido de cerca por el trabajo de Poiseuille. Poiseuille estudió problemas de flujo capilar para entender mejor la circulación de la sangre a

través de los vasos capilares en el cuerpo humano. Descubrió la relación (conocida como la ley de Hagen-Poiseuille) entre la velocidad de flujo y la caída de presión para un tubo capilar,

Un viscosímetro capilar consta esencialmente de cuatro partes: un depósito de líquido, un capilar de dimensiones conocidas, un dispositivo de control y medida de la presión aplicada y un dispositivo para determinar la velocidad de flujo. Los viscosímetros comerciales pueden dividirse en dos tipos principales: los viscosímetros de cilindro-pistón y los de capilar de vidrio (Lapasin y Pricl, 1995). Los viscosímetros capilares con el principio de funcionamiento cilindro-pistón se suelen presentar también como reómetros (como se efectuará en el presente estudio).

La Sociedad Norteamericana para Pruebas y Materiales (ASTM) genera normas para la medición y el informe de viscosidades.

En la figura se muestran dos recipientes conectados por un tubo largo de diámetro pequeño, conocido como **tubo capilar**. Conforme el fluido fluye a través del tubo con una velocidad constante, el sistema pierde algo de energía, ocasionando una caída de presión que puede ser medida utilizando un manómetro.

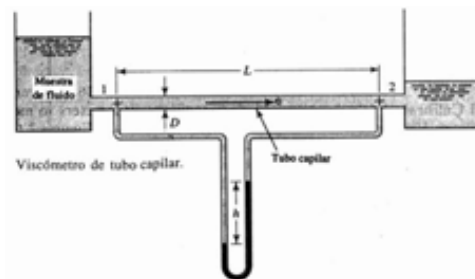


Figura 4.6. Viscosímetro con tubo capilar

La magnitud de la caída de presión está relacionada con la viscosidad del fluido mediante la siguiente ecuación:

La viscosidad se obtiene de la expresión:

$$\mu = \frac{(p_1 - p_2)D^2}{32UL} \quad (4.8)$$

Donde, $(p_1 - p_2)$ es la caída de presión en el tubo capilar (bar), D es el diámetro del tubo capilar (m), U, es la velocidad del fluido (m/s) y L es la longitud del tubo (m).

4.2.2.5.1 Viscosímetro capilar de vidrio

Los viscosímetros capilares de vidrio están diseñados para dejar pasar a través del capilar un caudal constante de líquido mediante la aplicación de una fuerza reproducible. Esta fuerza se genera por la presión que ejerce la carga hidrostática debido a los diferentes niveles de las superficies líquidas en el mismo viscosímetro. El tiempo durante el cual el líquido fluye, es por consiguiente, además de la corrección por energía cinética, proporcional al cociente, entre la viscosidad absoluta y la densidad, esta razón es por definición la viscosidad cinemática de un líquido. Se requiere un control exacto de la temperatura y el tiempo de flujo. La viscosidad cinemática de un líquido se determina experimentalmente usando la siguiente ecuación:

$$v = C \cdot t \quad (4.9)$$

siendo, v , la viscosidad cinemática del líquido (cSt), C, constante del viscosímetro y t, tiempo de flujo (s).

El valor de la constante C se determina mediante el uso de líquidos de viscosidades conocidas o mediante el uso de tablas apropiadas para el viscosímetro en cuestión. En este tipo de viscosímetros se podrán determinar viscosidades a diferentes temperaturas requiriéndose un baño termostático en caso de querer realizar la experiencia a una temperatura diferente a la ambiente. Además, se necesita un soporte que permita que el viscosímetro pueda ser asegurado en una posición vertical.

aparato que se muestra en la figura 4.8 mide la viscosidad utilizando la definición de viscosidad dinámica dada en la ecuación,

$$\mu = \frac{\tau}{\left(\frac{\Delta v}{\Delta y}\right)} \quad (4.10)$$

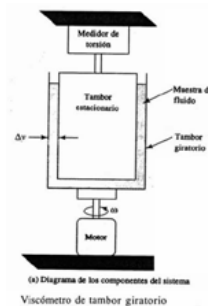
Se hace girar el tambor exterior a una velocidad angular constante, Ω , mientras que el tambor interior se mantiene estacionario. Por consiguiente, el fluido que está en contacto con el tambor giratorio tiene una velocidad lineal, v , conocida, mientras que el fluido que está en contacto con el tambor interior tiene una velocidad cero.

Se impone una consideración especial al fluido que se encuentra en el fondo del tambor, pues su velocidad no es uniforme en todos los puntos. Debido a la viscosidad del fluido, se presenta una fuerza de arrastre sobre la superficie del tambor interior que ocasiona el desarrollo de un par cuya magnitud puede medirse con un torquímetro sensible. La magnitud de dicho par es una medida de la tensión de corte, τ , del fluido. Así pues, la viscosidad μ puede calcularse utilizando la ecuación anterior.



(b) Viscosímetro disponible comercialmente

Figura 4.8. Viscosímetro rotatorio comercial



(a) Diagrama de los componentes del sistema
Viscosímetro de tambor giratorio

Figura 4.9. Viscosímetro de tambor giratorio

4.2.2.7 Viscosímetro de Stormer

Este viscosímetro consta de dos cilindros concéntricos siendo el interior móvil y el exterior fijo, colocándose el fluido cuya viscosidad se quiere determinar en el espacio comprendido entre estos.

El cilindro interior puede girar por medio de un hilo enrollado en una polea y en cuyo extremo lleva un peso. Se puede deducir que, para este equipo, la viscosidad se expresa en función del par necesario para hacer girar el cilindro interior a Ω_0 rev/s a partir de la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{T_n}{4\Omega_0 L \pi} \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) \quad (4.11)$$

siendo, T_n , el par necesario, L , la longitud del cilindro interior (m), Ω_0 , número de rps, r_1 , radio del cilindro exterior y r_2 del cilindro interior (m)

El par necesario se puede calcular conociendo el peso que se colocó en el extremo del hilo y el radio de la polea. En este equipo se determinan viscosidades de muestras a temperatura ambiente ya que carece de baño calefactor. La expresión que permite hallar las revoluciones por segundo (Ω_0) se define:

$$\Omega_o = \frac{L_r}{\pi D_i t} \quad (4.12)$$

Donde, L_r , es longitud recorrida (m), D_i , es el diámetro del cilindro interno (m) y t , es el tiempo medido (s).

Se deberán realizar medidas de una misma muestra con tres pesos diferentes, y además, se deberán efectuar como mínimo tres medidas de tiempo en cada determinación.



Figura 4.1. Viscosímetro de Stormer

4.2.2.8 Viscosímetro Brookfield

Es un viscosímetro rotacional, provisto de dos tipos de rotores: cilíndricos y en forma de disco. El rotor se sumerge en el fluido en estudio y va acoplado, por medio de un resorte calibrado, a un motor de velocidad variable. Cuando el rotor gira la deformación del resorte es proporcional al par necesario para vencer la resistencia viscosa del fluido al movimiento. Esta deformación se indica en un visor digital y es proporcional a la viscosidad del fluido.

Cuando se trabaja con rotores cilíndricos es posible deducir analíticamente la expresión que relaciona el esfuerzo de corte τ con el par M leído en el instrumento (considerando un fluido newtoniano) así como también la relación entre la velocidad de deformación y la velocidad angular Ω :

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L} \quad (4.13)$$

$$\left(\frac{-dv_y}{dx} \right) = \frac{2\Omega R_c^2 R_b^3}{X 2R_c^2 R_b^3} \quad (4.14)$$

En las expresiones anteriores L , R_b y R_c son parámetros que dependen del tamaño del rotor. Para los rotores con forma de disco la deducción no es tan sencilla, pero es correcto

considerar que τ es proporcional al par M y la velocidad de deformación dv_y/dx es proporcional a la velocidad angular Ω .

Para un fluido de determinada viscosidad, la resistencia al movimiento será mayor a mayor velocidad o mayor tamaño de rotor. Por lo tanto, el rango mínimo de viscosidades se medirá con el rotor más grande girando a la máxima velocidad (100 rev/min), e inversamente, el rango máximo de viscosidades se medirá con el rotor más pequeño a la velocidad mínima (0,5 rev/min). Las medidas hechas con un mismo rotor a distintas velocidades permiten obtener las características reológicas del fluido.



Figura 4.10. Viscosímetro Brookfield

4.2.2.9 Viscosímetro de placas deslizantes

En estos viscosímetros, el fluido que va a ser ensayado se introduce entre dos placas deslizantes paralelas. Después de que se miden la velocidad y el esfuerzo de cizalla, la μ se puede evaluar fácilmente según la ecuación general que define la viscosidad.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (4.15)$$

La teoría de operación de este viscosímetro es simple, y es adecuado para la medida de grandes viscosidades tal como polímeros fundidos. Sin embargo, no son convenientes para las medidas de poca viscosidad.



Figura 4.11. Representación del deslizamiento de las placas

4.3 REÓMETROS

4.3.1 REÓMETROS DE TUBO CAPILAR

El principio de un reómetro de tubo capilar se basa en la *Ecuación de Hagen-Poiseuille* la cuál es válida para los líquidos newtonianos. Básicamente, con un viscosímetro capilar, se necesita medir la caída de presión y el caudal independientemente para medir la viscosidad. Puesto que la viscosidad de un líquido newtoniano no varía con la velocidad de deformación, es suficiente tener una medida a cualquier velocidad del flujo. Sin embargo, para los líquidos no newtonianos, es más complicado porque la viscosidad varía con la velocidad de deformación.

En un reómetro de tubo capilar, el líquido es forzado a través de un tubo capilar cilíndrico con una superficie interna lisa. Los parámetros del flujo tienen que ser elegidos de una manera tal que el flujo pueda considerarse estacionario, isoterma y laminar. Sabiendo las dimensiones del tubo capilar (es decir, su diámetro y longitud internos), se puede determinar la dependencia funcional entre el caudal volumétrico y la caída de presión debido a la fricción. Si se realizan las medidas de modo que sea posible establecer esta dependencia para los varios valores de la caída de presión o caudal, después se puede determinar la curva del flujo del líquido.

Para los líquidos no newtonianos, puesto que la viscosidad varía con la velocidad de cizalla, se necesita variar la presión en el depósito para cambiar la velocidad de cizalla. Para determinar la curva del flujo de un líquido no Newtoniano, es necesario establecer la dependencia funcional del esfuerzo cortante frente a la velocidad de cizalla en un amplio rango de velocidades.

En un reómetro típico de tubo-capilar, de radio interno R_c y una longitud de L . Se asume que el cociente de la longitud capilar en relación a su radio interno es tan grande que se pueden despreciar los efectos que ocurren en las regiones de la entrada y de la salida del tubo capilar. Entonces, el esfuerzo cortante en la pared del tubo puede ser obtenido mediante (4.16):

$$\tau_w = \frac{R_c \Delta P_c}{2L_c} \quad (4.16)$$

donde, τ y τ_w son tensiones de cizalla en la distancia r y en la pared del tubo respectivamente (Pa), R_c , es la distancia del eje capilar (m), ΔP_c : diferencia de presión a través de un tubo capilar (bar) y L_c : Longitud característica (m)

La distribución de la tensión de cizalla es válida para los líquidos de cualquier característica reológica. En el caso de un líquido newtoniano, la velocidad de cizalla en la pared del tubo puede ser expresada como determina la *ecuación de Hagen-Poiseuille*:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R_c^3} \text{ Velocidad de cizalla en la pared} \quad (4.17)$$

$$Q = \frac{\pi R_c^4 \Delta P_c}{8\mu L_c} = \pi R_c^2 U = \text{caudal volumétrico (Hagen-Poiseuille)} \quad (4.18)$$

$$\Delta P = \frac{8L\eta Q}{\pi R^4} \quad (4.19)$$

Donde, U , es velocidad principal, ΔP , es la diferencia de la presión a través del tubo capilar, L y R , son la longitud y el radio del tubo capilar, Q , es el caudal volumétrico y μ , es la viscosidad del líquido que atraviesa el tubo capilar. También se utiliza η al tratarse de fluidos no newtonianos

Los viscosímetros y reómetros capilares posiblemente sean los más utilizados. (Wisniewski et. al., 2003, 2005; Barrufet y Setiadarma, 2003; Bhide et. al., 2003).

4.3.1.1 Reómetros de pistón

En estos reómetros, el fluido es obligado a salir del depósito, a través de un tubo o capilar, por medio de un pistón accionado por un dispositivo mecánico, neumático o hidráulico. Los datos que se obtienen son la diferencia de presión entre dos puntos, y el gasto, o velocidad de flujo volumétrico, que se evalúa a partir de la velocidad de flujo másico. El ángulo formado entre el depósito y el capilar (ángulo de entrada) es importante para evitar la formación de turbulencias en los fluidos viscoelásticos.

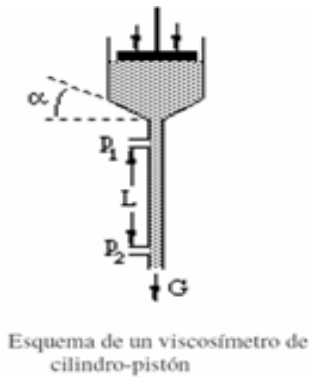


Figura 4.12. Esquema de un viscosímetro de cilindro-pistón

El reómetro diseñado en este proyecto tiene especial relación con el reómetro anterior, ya que constará de un tubo capilar, un cilindro y un pistón y donde este último es accionado por un sistema oleohidráulico posibilitando aplicar diferentes velocidades de cizalla al proceso de extrusión del material objeto de estudio.

4.3.2 REOMETROS ROTACIONALES

El funcionamiento de un reómetro rotacional se basa en la resistencia a la torsión que ofrece un líquido al giro de un husillo de características conocidas, sumergido en dicho líquido. El cilindro o disco (husillo) giratorio, está acoplado con un muelle al árbol motor que gira a velocidades determinadas. El ángulo de desviación del eje se mide electrónicamente dando la medida de torsión.

Los cálculos realizados dentro de los reómetros se realizan a partir de las medidas de la fuerza de torsión, de la velocidad del eje y de sus características y ofrecen una lectura directa de la viscosidad en centipoises o Pas.

Los reómetros disponen de varios tipos de husillos y con una extensa gama de velocidades, proporcionando así una gran capacidad de medida de viscosidad. Para cualquier líquido de viscosidad determinada, la resistencia al avance aumenta proporcionalmente a la velocidad de rotación del husillo o al tamaño del mismo. Las combinaciones de husillos y velocidades, permiten elegir una escala óptima para cualquier medición, dentro de la gama del equipo. Los cambios de rango pueden realizarse utilizando el mismo husillo a diferentes velocidades para determinar las propiedades reológicas de un líquido.

4.3.2.1 Reómetro rotatorio

Los reómetros rotatorios se basan en el análisis del flujo constante en el espacio anular entre los cilindros largos, coaxiales. Para el caso en el que el cilindro interno sea el que rote y el externo sea fijo, la viscosidad aparente η puede ser relacionada con el esfuerzo de torsión requerido como siguen,

$$\eta = \frac{G}{2\pi L \Omega} \left(\frac{1}{R_1^2 - R_2^2} \right) \quad (4.20)$$

donde, R_1 , es el radio externo del cilindro interno y R_2 es el radio interno del cilindro externo (m), L : es la longitud mojada de los cilindros (m), Ω , es la velocidad angular del cilindro interno (r.p.m) y G : es el modulo de rigidez del material.

Los reómetros rotatorios son convenientes para las medidas de viscosidad altas, y permiten los ajustes de la velocidad de cizalla de manera sencilla.



Figura 4.13 Viscosímetro rotacional

Con frecuencia se emplean dos geometrías en estos tipos de reómetros: placa-placa y cono-placa.

4.3.2.1.1 Cilindro-coaxial rotatorio (tipo de Couette)

En un sistema de cilindro-coaxial, la velocidad de cizalla se determina en función a las dimensiones geométricas de los elementos y la velocidad de rotación. La tensión de cizalla se calcula por medio del esfuerzo de torsión y de las dimensiones geométricas. Cambiando la velocidad del elemento rotatorio, se pueden recoger diversos esfuerzos de torsión, que se utilizan para la determinación de la curva de la velocidad de cizalla con respecto a la tensión de cizalla.

Una vez que se mida el esfuerzo de torsión que se ejerce en el cilindro interno o externo, la tensión de cizalla y la velocidad de cizalla se pueden calcular como siguen [Macosko, 1994]:

$$\tau(R_1) = \frac{M_1}{2\pi R_1^2 H} \quad (4.21)$$

$$\tau(R_0) = \frac{M_0}{2\pi R_0^2 H} \quad (4.22)$$

$$\dot{\gamma}(R_1) \cong \dot{\gamma}(R_0) = \frac{\Omega \bar{R}}{R_0 - R_1} \quad \text{cuando} \quad 1 > \frac{R_1}{R_0} \geq 0.99 \quad (4.23)$$

Donde:

- R radios de cilindros internos y externos, respectivamente

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_0}{2} \quad (4.24)$$

Siendo, M y M_0 , el apriete ejercido en los cilindros internos y externos (N·m), respectivamente, H , es altura del cilindro interno (m) y Ω , es la velocidad angular (r.p.s).

4.3.2.1.2 Cono y Placa

La característica común de un reómetro de cono y placa es que el líquido está cizallado entre una placa llana y un cono con un ángulo determinado. El sistema de cono-placa produce un flujo en el cual la velocidad de cizalla es casi completamente uniforme. Consideremos un líquido, el cual se sitúa en el espacio entre una placa y un cono con un ángulo β .

Típicamente, el ángulo del hueco, β , es muy pequeño ($\leq 4^\circ$). El índice de cizalla del líquido depende del ángulo de dicho hueco, β , y la velocidad lineal de la placa. Si se asume que el cono es inmóvil y la placa rota con una velocidad angular constante de Ω , la tensión de cizalla y la velocidad de cizalla se pueden calcular mediante el esfuerzo de torsión experimental medido, M , y las dimensiones geométricas.

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3} \quad (4.25)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\beta} \quad (4.26)$$

4.3.3 Magnetoreómetro

Similar al viscosímetro de caída de esfera o cilindro,

$$F = 3\pi d_e \mu U_1 \quad (4.27)$$

Siendo, F , la fuerza en la esfera (N), d_e , el diámetro de la esfera (m), U_1 , la velocidad terminal del líquido (m/s) y μ , la viscosidad del líquido (Pa·s).

La fuerza aquí puede ser la gravedad (peso) para los viscosímetros de caída de cuerpos aunque también puede ser una fuerza magnética como en este caso (Mattischek y Sobczak, 1994). La fuerza magnética se expresa como:

$$F_m = mX_m H \frac{dH}{dz} \quad (4.28)$$

donde, F_m , es la fuerza magnética en la esfera, m , la masa, X_m : la susceptibilidad, H , es la fuerza del campo magnético, $\frac{dH}{dz}$,: el gradiente del campo y z , la dirección del movimiento forzado de la esfera.

La velocidad de cizalla puede ser ajustada con el uso del campo magnético. El magnetoreómetro presenta buenos resultados tanto para medidas de baja como alta viscosidad (Mattischek y Sobczak, 1994). Comúnmente, esta técnica se limita a los fluidos de poca viscosidad.

4.3.4 Reómetro magnético de esfera levitada

Es un tipo de reómetro desarrollado recientemente (Royer et. al., 2002). Se hace situar una esfera en una posición fija en el interior del líquido de prueba por obra de un campo magnético dentro de un recipiente preparado para alta presión. Moviendo verticalmente el tubo cilíndrico en el que se encuentra la esfera, se genera un flujo de cizalla. La fuerza magnética que se necesita para mantener la posición de la esfera se relaciona con la viscosidad del líquido de prueba. La técnica requiere calibraciones especiales para medidas de viscosidad exactas.

$$\mu = \frac{K(I - I_0)}{U_p} \quad (4.29)$$

donde, I e I_0 , son intensidades del campo magnético, K , constante especificada por la geometría del reómetro y la esfera y U_p es la velocidad del fluido en la pared del tubo.

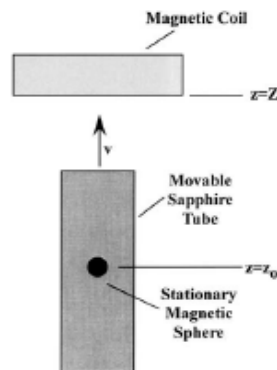


Figura 4.14. Representación del funcionamiento del Reómetro magnético de esfera levitada

4.3.5 Reómetro de extrusión de plato deslizante

El reómetro de alta presión de extrusión con plato deslizante es un reómetro capilar de extrusión pero con pequeñas modificaciones, es conveniente para las medidas de gran viscosidad tales como algunos polímeros fundidos (Royer et. al., 2000, 2001; Lan y Tseng, 2002). La viscosidad de un polímero fundido se calcula con las ecuaciones siguientes (Royer et. al., 2000, 2001),

$$\text{Tensión de cizalla} \quad \tau_w = \left(\frac{-\Delta P}{L} \right) \frac{H}{2} \quad (4.30)$$

$$\text{Velocidad aparente de cizalla} \quad \dot{\gamma} = \left(\frac{6Q}{wH^2} \right) \quad (4.31)$$

$$\text{Viscosidad aparente} \quad \eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_{app}} \quad (4.32)$$

Donde, L , es la longitud (m), W , la anchura (m), H , la altura, ΔP la diferencia de presión (bar) y Q , el caudal volumétrico (m³/h).

El reómetro se utiliza para la medida de grandes viscosidades con control en la velocidad de cizalla y puede tener acceso a materiales con comportamientos no newtonianos. Sin embargo, no es conveniente para los sistemas que demuestran viscosidad baja.

4.3.6 Reómetro extensional o elongacional

El estrechamiento y posterior rotura de filamentos como consecuencia de una extensión ofrece una valiosa información acerca de las propiedades físicas del material.

Este análisis ofrece una determinación rápida de los siguientes parámetros:

- Viscosidad
- Tensión superficial
- Elasticidad

- Limite de fluidez



Figura 4.15. Viscosímetro extensional

4.4 DECISIÓN

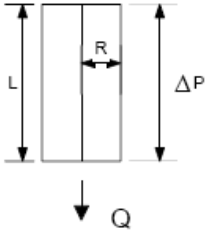
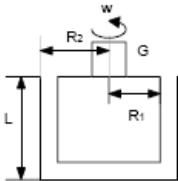
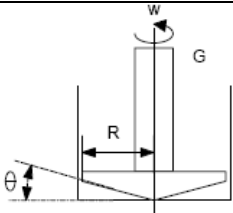
Tras el estudio de todos los tipos de instrumentos capaces de medir la viscosidad se debe elegir un modelo inicial con el que apoyar el desarrollo del diseño del reómetro concerniente a la empresa General Dynamics.

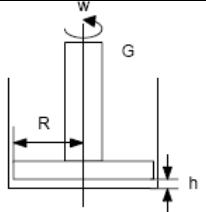
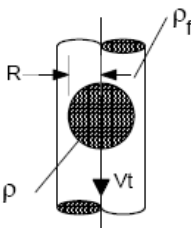
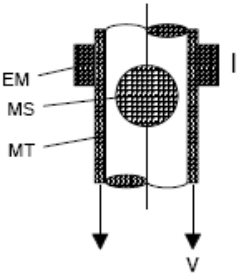
Para la elección es necesario conocer el producto que se dispone a medir. El reómetro será destinado para la medida de pólvora de doble y triple base, es decir, para un fluido no newtoniano viscoelástico, por tanto, se necesita un instrumento de medida que pueda efectuar distintas velocidad de cizalla y capaz de medir con exactitud los parámetros reológicos mas importantes. Además, la empresa conocía con anterioridad el buen funcionamiento de los reómetros capilares en su “campo de productos”, por lo que en la medida de lo posible deseaban que se les proporcionara un reómetro capilar con el fin de, aparte de mejorar el control sobre su producto, asemejar los resultados obtenidos con las prensas grandes de extrusión. Los reómetros capilares de extrusión son muy fiables para este tipo de medidas, se podría aprovechar los sistemas hidráulicos de la empresa y con su ayuda podríamos mejorar el comportamiento de las prensas.

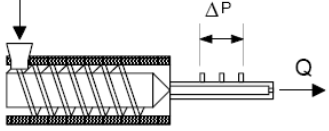
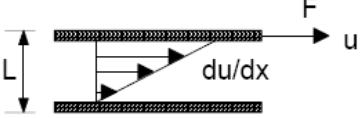
De manera que el diseño constará de un reómetro capilar de extrusión con diversos sensores para asegurar fiabilidad en la medida, en un fluido al que afectan numerosos parámetros, y de dimensiones reducidas para rapidez en la medida y fácil movilidad.

Se explica con detalle en el capítulo 5.

4.5 RESUMEN DE LOS VISCOSIMETROS y REOMETROS MÁS IMPORTANTES

VISCOSIMETRO	DIBUJO REPRESENTATIVO	ECUACION DE COMPORTAMIENTO	Características	Gama del uso
CAPILAR		$\Delta P = \frac{8L\mu Q}{\pi R^4}$	Ninguna necesidad de datos de la densidad, pero el número de Reynolds debe ser más bajo de 2100.	De poca viscosidad, solventes, soluciones diluidas
COAXIAL ROTATIVO		$\mu = \frac{G}{2\pi L \Omega} \left(\frac{1}{R_1^2 - R_2^2} \right)$	Velocidad controlable de cizalla. Para cargar difícilmente el polímero y controlar la presión.	Medio de gran viscosidad, polímero fundido
CONO PLACA ROTATIVO		$\mu = \frac{3G}{2\pi R^3 \omega} \theta$	Velocidad controlable de cizalla. Fácil de cargar el polímero.	Medio de gran viscosidad, polímero fundido

<p>DISCO ROTATORIO</p>		$\mu = \frac{3Gh}{\pi R^4 \omega}$	<p>Velocidad controlable de cizalla. Fácil de cargar el polímero.</p>	<p>Medio de gran viscosidad, polímero fundido</p>
<p>CAIDA BOLA</p>		$\mu = \frac{(2/9)(\rho_s - \rho)gR^2}{Vt}$	<p>Necesita medidas de la densidad, la velocidad de cizalla no puede ser controlada.</p>	<p>Medio de viscosidad baja, soluciones diluidas de polímero</p>
<p>MAGNETOVISCOSIMETRO</p>	<p>UNA MODIFICACION DEL ANTERIOR</p>	<p>N/A</p>	<p>Substituye el campo de la gravedad en los viscosímetros de caída de cuerpos por el campo magnético controlable.</p>	<p>Medidas bajas y de gran viscosidad</p>
<p>ESFERA LEVITADA</p>		$\mu = \frac{K(I - I_0)}{v}$	<p>Funciona con presión constante, en toda la gama de la concentración desde el polímero puro a la solución de polymer/SCF, con velocidad controlable de cizalla</p>	<p>Medidas bajas y de gran viscosidad</p>

<p>PLATO DESLIZANTE</p>		$\tau_w = \left(\frac{-\Delta P}{L} \right) \frac{H}{2}$ $\dot{\gamma} = \left(\frac{6Q}{wH^2} \right)$ $\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_{app}}$	<p>Velocidad controlable cizalla.</p>	<p>de Las medidas de gran viscosidad, especialmente convenientes para el polímero derriten.</p>
<p>PLACA DESLIZANTE</p>		$\tau = \eta * \dot{\gamma}$	<p>Velocidad controlable cizalla.</p>	<p>de Medida de gran viscosidad.</p>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL REÓMETRO

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se especifica el instrumento con el cuál se pueden determinar las características reológicas de un fluido No Newtoniano. Particularmente el diseño consiste en un reómetro capilar de extrusión el cual tiene una utilidad especial para el conocimiento del comportamiento de la pólvora de doble y triple base. Además, el estudio se ha realizado para cumplir las exigencias de la empresa General Dynamics Santa Bárbara Sistemas que es para quien, en primera instancia, va estar destinado el reómetro.

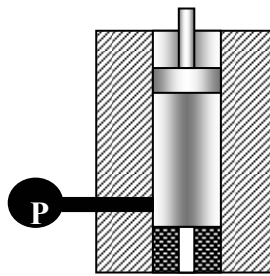


Figura 5.1. Esquema básico de funcionamiento del reómetro capilar

Como se explicó, la diferencia principal entre un viscosímetro y un reómetro es que mientras que el primero trabaja a una velocidad de cizalla fija, el reómetro permite generar distintas velocidades de trabajo. Esto es necesario para generar en última instancia la curva de flujo con la que trabajaremos para determinar el comportamiento que tendrá el producto y así saber si cumplirá o no las necesidades impuestas por la empresa.

La reología, estudio de la deformación del flujo, es muy importante dentro de los desarrollos y uso comercial de muchas sustancias poliméricas. En general, las propiedades o parámetros reológicos son determinados por la medida de las propiedades de flujo, realizando por ejemplo una extrusión por un orificio capilar de una masa de polímero fundido. El conocimiento de estas propiedades son muy importantes porque además de determinar calidades y rendimientos de la sustancia, nos aporta información con la cual se pueden deducir procesos en la elaboración que no se han efectuado correctamente, lo que permite conocer mejor el producto.

El presente reómetro está principalmente diseñado para obtener resultados en fluidos no Newtonianos pero es capaz de trabajar con fluidos que siguen la ley de Newton obteniendo resultados muy fiables. También se puede adaptar para determinar las propiedades reológicas de líquidos y materiales plásticos a temperaturas para las que la deformación de viscosidad es predominante en estado fundido.

Para determinar adecuadamente las propiedades reológicas de la sustancia requerida, el instrumento test debe ser capaz de medir la temperatura y la presión de prueba sobre todo a la entrada del tubo capilar con el fin de garantizar la exactitud de los datos obtenidos.

El reómetro tiene un funcionamiento sencillo por lo que es fácil de entender y utilizar, lo cual otorga muchas ventajas sobre otros equipos similares, aparte de obtener buenos resultados en las medidas y ser de fácil manejo, tiene la posibilidad de limpiarse de forma rápida y sin peligro.

El objetivo de la empresa en lo referente al uso del instrumento es el utilizarlo con el fin de conocer las propiedades reológicas de su producto y con mayor precisión que en la actualidad, para así poder evaluar la calidad que tendrá la pólvora antes de la extrusión en la prensa (prácticamente la última fase de elaboración del producto). Es decir, actualmente la empresa conoce la calidad real de la pólvora en la fase de tiro (fase de prueba donde se mide la velocidad con la que la pólvora propulsa un proyectil y última fase de la cadena de producción), de manera que si tuviera la posibilidad de conocer esa calidad a la salida de las amasadoras (primera parte del proceso productivo) ahorraría una enorme cantidad de tiempo y dinero. Para ello pretenden establecer las propiedades o parámetros reológicos más importantes de una muestra de producto de la que se está seguro sus buenos resultados (que se utilizará como patrón o referente), realizar un reograma, proponer un rango de calidad en el cual las muestras venideras puedan encontrarse y sencillamente comparar cada partida posterior de pólvora con los datos del patrón para establecer si cumple o no las expectativas de la empresa. El parámetro que más información nos puede proporcionar es la *viscosidad*.

Para el producto de la empresa existen diversos factores que pueden afectar con más o menos magnitud; existen diversos estudios donde se comparan muestras de pólvora en las que se ha modificado el contenido de agua en el disolvente, el tipo de Nitroguanidina o Nitrocelulosa, así como la temperatura de la muestra para ver los efectos que estos cambios implican en la calidad y comportamiento final del producto. Estos efectos podrían ser mejor controladas con el reómetro, por lo que se puede obtener un producto más competitivo al evaluar cada fase de producción y mejorarla.

Debido a que la pólvora es un fluido no Newtoniano viscoelástico y como hemos visto, con muchas variables que le afectan, necesitamos un instrumento capaz de aplicar mayor control sobre el proceso productivo de la pólvora y con el que podamos deducir la calidad de manera fiable y anticipada. De manera que por la capacidad de atribuir mayor control sobre las variables, de aplicar distintas velocidades de cizalla (para la obtención de las curvas de flujo), por la fiabilidad de los resultados obtenidos, por los conocimientos de la empresa con aparatos de este tipo, por la extrapolación que después puede hacerse a las prensas grandes de extrusión de la pólvora (fase de prensado), por el aprovechamiento de la instalación oleohidráulica utilizada por la empresa, por la buena aplicación en fluidos no Newtonianos, por la facilidad con la que se lleva a cabo la acción de limpieza y por la cantidad de estudios que se aseguran su buen funcionamiento, facilidad de uso y obtención de datos corregidos, hemos optado por realizar este REÓMETRO CAPILAR DE EXTRUSIÓN.

5.2 DEFINICIÓN DEL REÓMETRO

5.2.1 Descripción del equipo

El instrumento consta de un cilindro de acero ST 52 con una tolerancia H8 de 60 mm de diámetro interior y una longitud de 100 mm dentro del cual se introducirá la masa-muestra de pólvora que será extruída por un tubo capilar colocado en su parte inferior. Dentro del cilindro se dispone un pistón que proporcionará la presión necesaria para la acción de

extrusión del material de muestra por el capilar debido a la acción definida por una instalación oleohidráulica (explicada más adelante) que permite accionar el pistón a distintas velocidades y presiones.

Debido a las distintas presiones que se originarán en el reómetro, se ha efectuado el cálculo de las paredes del espesor del cilindro según la norma DIN 2413. Esta expresión permite el cálculo del espesor de la pared en función de la presión que va a ejercer el pistón sobre la muestra y el diámetro interno del cilindro, de la forma:

$$St = d_i \frac{p}{20 \frac{R_p 0.2}{k} e - 2p} \quad (5.1)$$

Donde, St, espesor teórico (mm), di, diámetro interno (mm), p, presión de trabajo máxima (Bar), Rp, 0.2 límite elástico del acero (N/mm²), e, eficiencia de la soldadura (para tubos sin soldadura, e=1)

$$St = 60 \frac{250}{20 \frac{470}{2} 1 - 2 * 250} = 3.571mm \quad (5.2)$$

Debiéndose tener en cuenta las tolerancias de fabricación del tubo, el espesor teórico se ha de corregir como sigue:

- S = 1.05 x St para tolerancia sobre el espesor ± 5 %
- S = 1.11 x St para tolerancia sobre el espesor ± 10 %
- S = 1.14 x St para tolerancia sobre el espesor ± 12.5 %

Por lo que en nuestro caso y al imponer un 12.5% de tolerancia el espesor del cilindro debe ser igual o superior a:

$$S = 1.14 \times 3.571 = 4.07 \text{ mm} \quad (5.3)$$

En la información comercial de empresas de hidráulica, para cilindros oleohidráulicos con tolerancia H8 y 60 mm de diámetro interior, se muestran como posibles espesores comercializados 5, 7.5, y 20 mm, puesto que se requiere máxima seguridad y el espesor debe ser mayor que 4.07 se propone un espesor de 20 mm ya que el de 5 mm y el de 7.5 aunque cumplirían sin problemas las expectativas, no dejarían suficiente espacio para la incorporación de los sensores. De esta forma el cilindro tendrá un diámetro exterior de 100 mm.

Con esto se consigue obtener un cilindro que cumpla la función para la cual ha sido fabricado con un tamaño reducido lo que es muy práctico a la hora de desplazarlo, limpiarlo y básicamente, trabajar con él; cumpliendo así una de las especificaciones de la empresa, la fácil movilidad y pequeño tamaño.

El vástago que introduce a la cabeza del pistón dentro del cilindro es de acero F 114 cromado 25μ con un diámetro de 45 mm. Las dimensiones del vástago se han establecido tras haber estudiado el circuito oleohidráulico y haber provisto con un diámetro de 80 mm a la parte superior del pistón (parte que es la primera que interactúa con el aceite que genera el movimiento). Ese diámetro de 80 mm se justificará en la parte del sistema oleohidráulico ya que los cálculos se realizan en función de los datos de partida en cuanto a presión y velocidades del pistón (los cuales se relacionan en primera estancia con el circuito oleohidráulico). Se añade que para un pistón de 80 mm de diámetro existen dos posibilidades de vástago comercial, de manera que se puede elegir un vástago de 45 mm (vástago normal) o de 56 mm (vástago reforzado); en nuestro caso hemos optado por el normal debido a que se ha considerado que cumpliría de sobremanera las exigencias requeridas. El vástago que hemos elegido será de la marca Parker.

La carrera efectuada por el pistón será de 100 mm. La cabeza del pistón será de BRONCE para evitar la chispa en el caso que rozara con las paredes del cilindro y de la marca Polypac. El pistón tiene la posibilidad de adoptar siete velocidades constantes

distintas con el fin de poder obtener así diferentes velocidades de cizalla. Las velocidades disponibles se consiguen con la combinación de las tres bombas del sistema oleohidráulico que aportan unos valores de 0.2, 1.25 y 2 mm/s respectivamente, de forma independiente funcionando con cada una de ellas.

El efecto que puede producir que la muestra de pólvora se introduzca en el espacio existente entre la parte del pistón introducida en el cilindro y dicho cilindro es un efecto que se quiere evitar a toda costa en la empresa y tomando como referencia las prensas de extrusión de la misma, se ha dispuesto de una capucha o placa que roscada encaja perfectamente con la cabeza del pistón y que tiene un diámetro prácticamente igual al del cilindro. Esta impacta sobre la muestra en el momento del prensado impidiendo así el desborde por el hueco que existe entre el pistón y el cilindro. Por la misma razón que la cabeza del pistón, el material elegido para la capucha será bronce, PVC o teflón con el fin de impedir la generación de la chispa en el interior del aparato.

El tubo capilar es un elemento muy importante para el cálculo de las propiedades reológicas en el reómetro, debido a que sus dimensiones permiten obtener los parámetros más relevantes (velocidad y esfuerzo de cizalla), de manera que el tubo debe tener unas medidas perfectamente conocidas. El tubo capilar debe ser resistente a las altas presiones que se generan en el interior del cilindro por lo que el material propuesto para el capilar será tungsteno (cumpliendo así la norma ISO 1133), teniendo que cumplir dos propiedades para estar dimensionalmente acorde con el resto del aparato; $d/D < 0.25$ siendo “d” el diámetro del tubo y “D” el diámetro interior del cilindro y $L/d > 2$ siendo “L” la longitud del tubo capilar. Cumpliendo con lo anteriormente enunciado las medidas adoptadas son:

$$\text{Diámetro del tubo: } 6 \text{ mm} \text{ ----- } d/D = 6/60 = 0.1 < 0.25 \quad (5.4)$$

$$\text{Longitud del tubo: } 30 \text{ mm} \text{ ----- } L/d = 30/6 = 5 > 2 \quad (5.5)$$

Por otra parte, se dispone de una configuración cómoda para poder extraer con facilidad el tubo capilar del aparato con el fin de facilitar su limpieza. Para ello se introduce

el tubo entre dos placas de acero con un apriete suficiente para asegurar que no se desplace el capilar o existan perturbaciones que puedan afectar a la medida, ese apriete lo conforma una tuerca de acero con un diámetro de 60 mm. Estas dos placas que sujetan el tubo disponen de una rosca en cada una de las paredes exteriores la cual encaja con el cuerpo inferior del cilindro de manera que forme un conjunto seguro. Un esquema representativo de se muestra en la siguiente figura (Plano despiece del cilindro-piston, adjuntado en el apartado de planos),

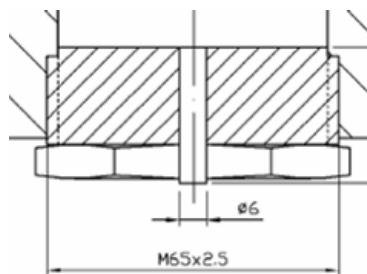


Figura 5.2. Como se puede extraer el capilar para su limpieza. Conjunto con el cilindro.

Este sistema permite separar el tubo capilar del resto del aparato de manera que sea más fácil realizar la acción de limpieza de todo el sistema de medida.

Para evitar la posibilidad de que penetre pólvora en la rosca en el momento de la extrusión debido al proceso de alta presión, se adopta la medida de no implantar la rosca hasta la parte mas cercana al inicio del tubo capilar (final del cilindro) como se muestra en la figura anterior. De esta manera no hay que implantar juntas de ningún tipo, con el sistema de rosca en el resto del cilindro y la tuerca, el sistema permanecerá fijo y soportará la presión de trabajo (sistema relacionado con las prensas de extrusión de la pólvora).

Debido al riesgo de explosión que conlleva trabajar con un material de estas características se debe tener en cuenta la adición de un gas inerte en el proceso de carga del cilindro por seguridad.

Para la acción de evacuación de los gases se propone que, debido a la pequeña cantidad de muestra utilizada y teniendo en cuenta la adición del gas inerte, lo más práctico

era instalar en la parte superior del aparato un tubo para introducir el nitrógeno que inertice la extrusión de la muestra y actúe en el disolvente volátil impidiendo su efecto negativo. Cuando el pistón se encuentre en su punto más alto (punto donde el pistón deja el máximo espacio libre en el cilindro) los gases que puedan haber quedado en el interior del cilindro se evacuarán sin problema por sí solos.

5.2.2 Descripción de la instrumentación

Se ha estudiado el cambio en las propiedades reológicas de la pólvora con las distintas temperaturas, por lo que se instala un sensor de temperatura en el interior del cilindro y próximo a la entrada del tubo capilar con el fin de tener un conocimiento claro de la temperatura a la que se está llevando a cabo el proceso y así hacer las comparaciones de las muestras de producto con el patrón siempre a la misma temperatura. Aunque a la salida de la amasadoras, que es en el momento en el cual se van a medir las propiedades de todas las masas producto, existe una temperatura muy aproximada. Este sensor será un termómetro infrarrojo con dos pt100 incorporados cuya medida no necesita contacto directo con la muestra. Debido a la atmósfera en la que trabaja el aparato, el sensor de temperatura así como el transmisor de datos están preparados para aplicación en entornos explosivos. El kit de medición de temperatura es de la empresa micro-epsilon que tienen experiencia en estos tipos de sistemas. El sensor estará separado 0.5mm de la muestra por la pared del cilindro, de forma que no se vea afectada la medida y la carrera completa del pistón no dañe al aparato. El sensor se coloca dentro de la pared del cilindro y se encuentra roscado para su mejor colocación y evitar su desplazamiento debido a las presiones que se generan (tal como se muestra en el plano detalle del cilindro-tubo capilar) y sus dimensiones son adecuadas para el espesor del cilindro y para el espacio del que disponemos. Se decide optar por este tipo de medidor de temperatura porque el sensor RTD pt100 necesita contacto directo con la muestra, con lo que tendríamos que proponer un espacio muerto al final de la carrera del pistón para no dañar el aparato y además, tanto este tipo de sensores como la gran mayoría dispone de una lanza (parte del sensor que mide) demasiado larga como para implantarla en el aparato.

Esta forma de medida puede afectar a la exactitud de la misma pero en realidad no se necesita saber exactamente la temperatura a la que se encuentra el producto a la entrada del tubo capilar, sino que utilizaremos este valor para realizar por un lado, la comparación con el “patrón de medida” (que todas las muestras se encuentren en un mismo rango de temperatura) y por otro lado, la posibilidad de realizar un estudio que manifieste la variación de la viscosidad con la temperatura de la pólvora de doble y triple base, para así controlar y entender mejor la fabricación y cualidades del producto.



Figura 5.3. Sensor de temperatura.

<i>Peso</i>	<i>420 gr</i>
<i>Rango de medida</i>	<i>-20 °C-100 °C</i>
<i>Certificación</i>	<i>ATEX</i>
<i>Exactitud</i>	<i>±0,1%</i>

Tabla 5.1. Características del Sensor de temperatura.

Para unas medidas correctas del esfuerzo y velocidad de cizalla hay que ser preciso con dos parámetros imprescindibles; la velocidad del pistón y la presión de la muestra a la entrada del capilar. La velocidad del pistón aporta junto con el radio del capilar el valor del caudal que circula por dicho tubo, lo que otorga un valor de la velocidad de cizalla, que se introducirá posteriormente en las curvas de flujo. Por consiguiente, para un conocimiento

claro de la velocidad del pistón, aparte de los datos ofrecidos por la instalación hidráulica se introducirá un dispositivo de medida de la velocidad del pistón situado en la cabeza éste.

Se trata de un sensor “LVDT” (sensor de desplazamiento) que se apoya en la superficie de la cabeza del pistón y consta de una varilla que lo fija a la pared que separará la instalación oleohidráulica del reómetro, para permanecer situado en una posición vertical invariable. Para fijar el sensor a la pared simplemente se incorpora una barra de acero que pegado al sensor sirva de sostenimiento al unir el otro extremo de la barra a la pared.



Figura 5.4. Sensor de desplazamiento.

<i>Peso</i>	<i>300 gr</i>
<i>Rango de medida</i>	<i>0-600 mm</i>
<i>Certificación</i>	<i>ATEX</i>
<i>Exactitud</i>	<i>±0,25% para mas de 450 mm</i>

Tabla 5.2. Características del Sensor de desplazamiento

El sensor dispone de la certificación ATEX y tiene una carrera máxima de 600 mm, con lo que cumple perfectamente con las exigencias del aparato y la empresa.

El sensor LVDT otorga un valor del desplazamiento que manifiesta el pistón en todo momento, pero no ofrece un valor de velocidad. Para ello se utilizará el fichero

temporal de salida del general del sistema de adquisición y proporcionará el tiempo que tarda el pistón en realizar dicho desplazamiento.

Para tener constancia del valor de presión a la entrada del capilar (no de la presión oleohidráulica, valor que otorga la instalación oleohidráulica) se instalará un transductor de presión que concretará el valor del esfuerzo de cizalla que junto a la velocidad de cizalla permite elaborar la grafica τ_{ap} vs γ_{ap} .

Para asegurar la exactitud de las medidas y teniendo en cuenta las dimensiones del reómetro se considera adecuado un sensor de tipo piezoeléctrico que se observa en la figura 5.5 y que proporciona la medida de la presión en función del tiempo con gran resolución temporal.

El instrumento de medida está certificado para utilización en atmósferas explosivas y se situará en el lado opuesto al sensor de temperatura en la entrada del tubo capilar.



Figura 5.5. Sensor de presión

<i>Peso</i>	<i>200 gr</i>
<i>Rango de medida</i>	<i>0,2 - 300 bar</i>
<i>Certificación</i>	<i>ATEX</i>
<i>Exactitud</i>	<i>±0,20%</i>

Tabla 5.3. Características del Sensor de presión

El sensor de presión dispone de una rosca que permite colocarlo en el interior del cilindro con seguridad.

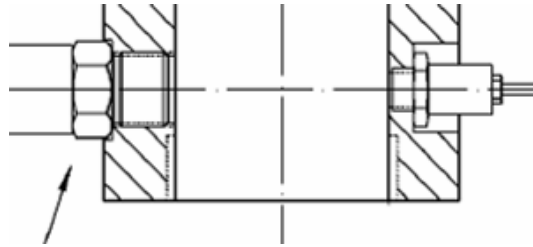


Figura 5.6. Representación de la colocación de los sensores en el interior del cilindro.

El soporte donde se sitúa todo el sistema de medida es de acero cuyas medidas quedan definidas en los distintos planos. El sistema de sujeción consta de una placa de acero donde se apoya el viscosímetro y otra superior con el fin de crear una estructura con cuatro barras (uniendo las esquinas de las placas) a modo de columnas de acero F114. Debido a la presión capaz de generar el reómetro, las columnas en las cuales descansan las dos placas donde se apoyan el cilindro y el pistón deberán ser de unos 40 mm de diámetro con el fin de que soporten el esfuerzo ejercido por el sistema oleohidráulico. De hecho, estas columnas soportan 20 kg/mm^2 que es un valor sustancialmente mayor que al que estarán sometidos en primera estancia ya que no excederá de los 5 kg/mm^2 .

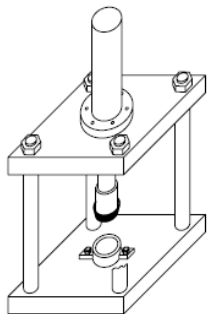


Figura 5.7 Estructura para el reómetro

5.3 DEFINICIÓN DEL SISTEMA OLEOHIDRAULICO

El sistema oleohidráulico se encontrará separado del aparato de medida por seguridad y por el hecho de no tener que utilizar válvulas ATEX (atmósfera explosiva o inflamable) cuyo coste es mucho más elevado que las válvulas normales.

El sistema oleohidráulico será capaz de aplicar sobre el pistón la presión necesaria para llevar a cabo la extrusión de la muestra de producto. Se debe proponer un modelo de instalación capaz de trabajar a unas velocidades fijas conocidas, regulando el caudal y aplicar unas presiones determinadas en función de las características geométricas de reómetro diseñado.

Teniendo en cuenta los valores de presión y velocidad utilizados en la prensa de extrusión de la empresa donde se produce la extrusión del producto explosivo para la creación de propulsores de doble y triple base, podemos hacer una extrapolación para determinar los parámetros del reómetro.

El fluido escogido para que lleve a cabo el movimiento del pistón en la instalación oleohidráulica es el HIDRO-VAL 46 HLP, es un fluido para uso exclusivo en mandos oleodinámicos. Tiene alta estabilidad con aditivos contra la formación de espuma e inhibidores de oxidación y corrosión, antidesgaste y extrema presión.

Las propiedades de este fluido son:

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ENSAYO	VALORES
Densidad a 15°C	ASTM-d-1298	0.870/0.880
Viscosidad cst a 40°C	ASTM-d-445	41.4/50.6
Pto. de inflamabilidad a v/a °c	ASTM-d-92	190 min
Punto de congelación °c	ASTM-d-97	-10 max
Índice de viscosidad	ASTM-d-2270	100 min
f.z.g.	DIN-51354	10 pasa

Tabla 5.4 Características del fluido oleohidráulico.

5.3.1 Cálculos básicos

El desplazamiento del pistón se efectuará a unas velocidades fijas y constantes de 0.2, 1.25 o 2 mm/s teniendo la posibilidad mediante el sistema oleohidráulico de combinar entre ellas estas velocidades que son proporcionadas por tres bombas. Además, esas velocidades

ofrecerán en el reograma puntos homogéneamente distribuidos para realizar con más precisión la grafica.

Bomba 1	•			•	•		•
Bomba 2		•		•		•	•
Bomba 3			•		•	•	•
Velocidad del pistón (mm/s)	0,2	1,25	2	1,45	2,2	3,25	3,45
Tiempo estimado de carrera (s)	500	80	50	69	45,4	30.7	29

Tabla 5.5 Velocidades proporcionadas por la instalación oleohidráulica.

La presión de trabajo en el interior del reómetro se encuentra en un rango de 140 a 180 bares aunque tendrá la posibilidad de funcionar con una presión máxima de 250 bares.

Teniendo en cuenta los valores de presión y velocidad a los cuales se queremos que trabaje la instalación pasamos a hacer los cálculos pertinentes para conocer las medidas del cilindro del reómetro.

Para un diámetro del cilindro de 60 mm y una presión máxima de 250 bares el esfuerzo será:

Superficie:

$$S_{60} = \pi \cdot D^2/4 = \pi \cdot 6^2/4 = 2.83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (5.6)$$

Para una presión de 250 bares, el esfuerzo:

$$F = P \cdot S = 250 \cdot 2.8.3 = 7.212,58 \text{ kg (f)} \quad (5.7)$$

Para una presión de trabajo del aceite de 180 bar y teniendo en cuenta el esfuerzo anterior, corresponde una superficie de:

$$S = F / P = 7068.58 / 180 = 3,927 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (5.8)$$

Para hallar el diámetro de la camisa del pistón (parte superior del pistón) despejamos en la ecuación de superficie:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{por lo que:} \quad (5.9)$$

$$D = \sqrt{4S/\pi} = \sqrt{4 \cdot 3,927 \cdot 10^{-3} / \pi} = 0,0707 \text{ m} = 7,071 \text{ cm} \quad (5.10)$$

Para trabajar con camisa normalizada se escoge un diámetro de 80 mm, con lo cual debemos tomar un vástago de 45 mm según lo indicado en los cilindros neumáticos CNV (adjunto en el apartado de Anexos).

Comprobación del diámetro mínimo del vástago:

$$D_{v_{\min}} = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot F \cdot S \cdot l_h^2}{E \cdot \pi^3}} = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot 7212 \cdot 4 \cdot 10^2}{2,1 \cdot 10^6 \cdot \pi^3}} = 1.297 \text{ cm} \approx 13 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Con lo que la presión queda:

$$S_{80} = \pi \cdot D^2/4 = \pi \cdot 8^2/4 = 5,0265 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (5.12)$$

$$P = F / S = 7068.58 / 50.26 = 140,62 \text{ bar} \quad (5.13)$$

La presión tiene relación con el esfuerzo. Ahora vamos a calcular el caudal que tiene que ver con la velocidad.

$$Q = S \cdot V_{el} \quad Q_{(\text{cm}^3/\text{min})} = S_{(\text{cm}^2)} \cdot V_{(\text{cm}/\text{min})} \quad (5.14)$$

Las unidades de la velocidad requerida (0.2, 1.25 y 2 mm/seg) las pasamos a una unidad más fácil con la que trabajar cm/min; de manera que:

$$0.2 \text{ mm/seg} = 1.2 \text{ cm/min}$$

$$1.25 \text{ mm/seg} = 7.5 \text{ cm/min}$$

$$2 \text{ mm/seg} = 12 \text{ cm/min}$$

Por lo que los caudales de trabajo quedarán de la siguiente forma:

$$Q_1 = 50.26 \cdot 1.2 = 60.312 \text{ cm}^3/\text{min} = 0,0603 \text{ l/min} \quad (5.15)$$

$$Q_2 = 50.26 \cdot 7.5 = 377 \text{ cm}^3/\text{min} = 0,377 \text{ l/min} \quad (5.16)$$

$$Q_3 = 50.26 \cdot 12 = 600.31 \text{ cm}^3/\text{min} = 0,603 \text{ l/min} \quad (5.17)$$

La potencia es $W = \frac{P \cdot Q}{450}$ pero teniendo en cuenta un 10% de pérdidas se aplica:

$$W = \frac{P \cdot Q}{400} \text{ por lo que en este caso:}$$

La máxima potencia, corresponde al máximo caudal.

$$W = \frac{140 \cdot 0.603}{400} = 0,1912 \text{ CV} \longrightarrow 0,1912 \cdot 1,1 = 0,211 \text{ CV} \quad (5.18)$$

Como 0.211 CV no existe propondremos una bomba la cual trabaje a 0.75 CV.

Como las bombas son muy pequeñas se debe elegir bombas más grandes y con reguladoras de caudal y por tanto la potencia necesaria será mayor (Estudiaremos si procede).

Como en la práctica la marca elegida para la bomba es *Salami* y la más pequeña es de 1 cm³, la máxima potencia será:

$$W = \frac{140 \cdot 1.8}{400} = 0.63 \text{ cv} \text{ ----- } 2 \text{ cv} \quad (5.19)$$

Con esta potencia, podremos realizar todas las combinaciones posibles con las tres bombas.

En cuanto a las pérdidas de carga que se podrían generar en la instalación, se indica que se ha tenido en cuenta que el caudal que pasa por cada uno de los tres elementos está en torno a 0.6 l/min. Teniendo en cuenta que las electroválvulas trabajan para 40 l/min, estas pérdidas deben de ser muy pequeñas. También se ha propuesto el 10% de pérdidas en el cálculo de la potencia y se ha redondeado de 0.63 CV a 2 CV en la potencia, por lo que las pérdidas quedarían compensadas de sobremanera por un precio poco más elevado.

En la siguiente figura se muestra el esquema de instalación oleohidráulica:

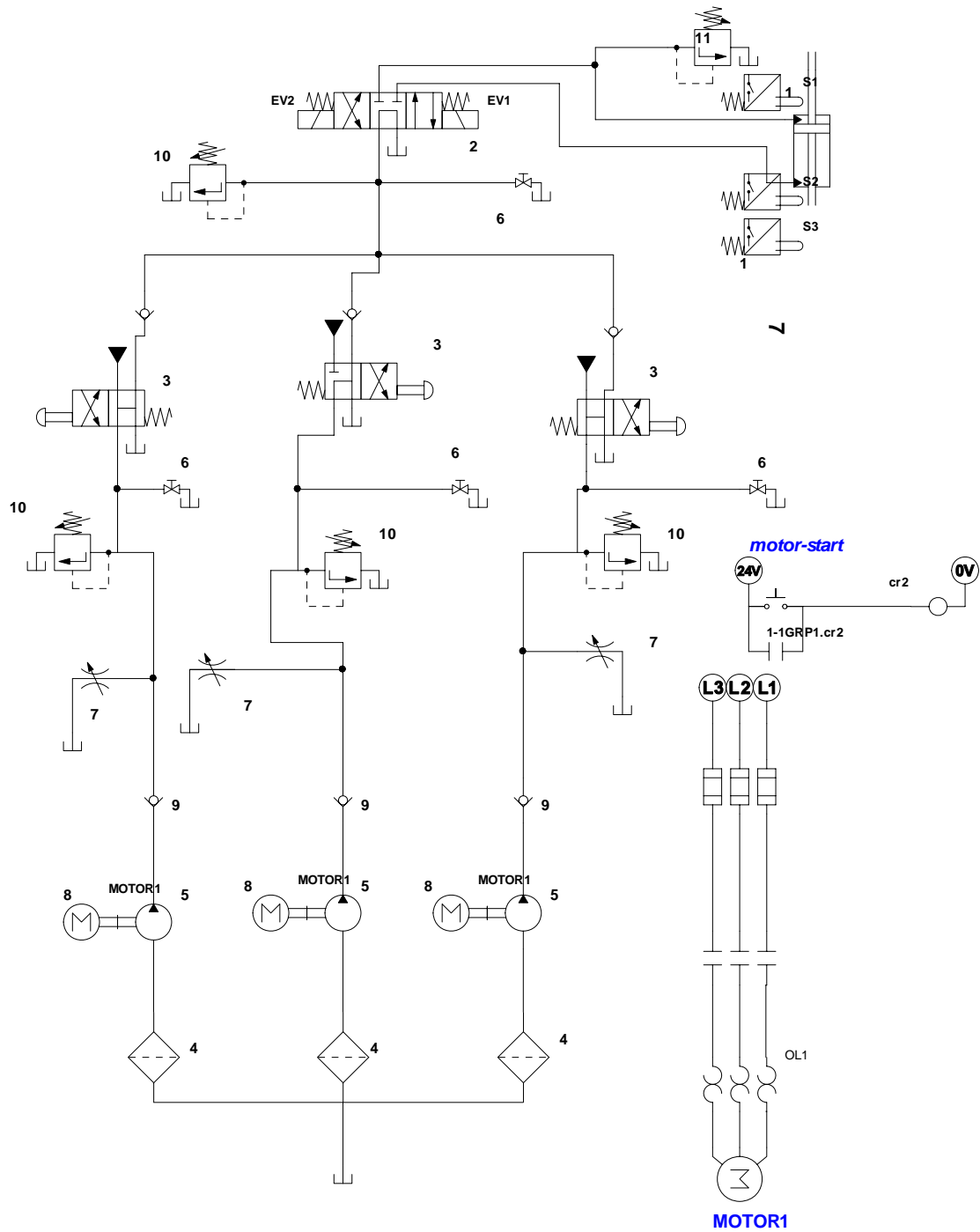


Figura 5.8 Esquema de la instalacion oleohidráulica

En la siguiente figura se muestra el esquema eléctrico de la instalación oleohidráulica:

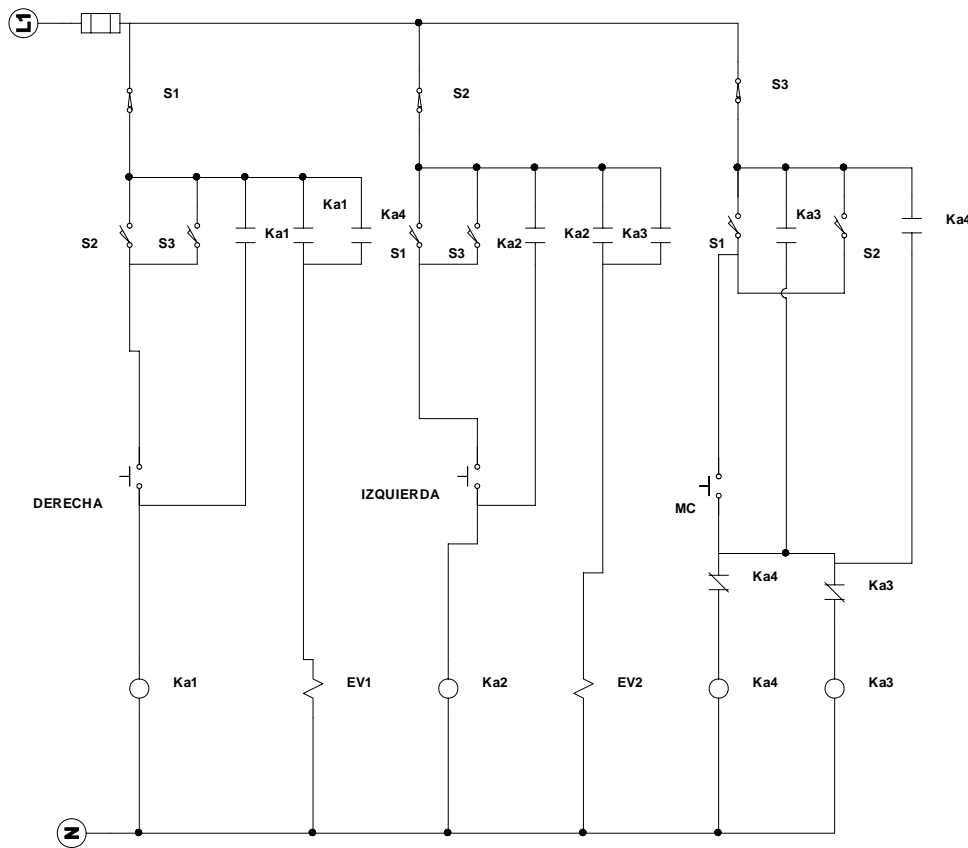


Figura 5.9 Esquema eléctrico de la instalación oleohidráulica que controla la electroválvula 2

5.3.2 Modo básico de funcionamiento

La activación del botón general de la instalación (motor-start) da paso a la recirculación del aceite por cada una de las tres bombas (5). Se ha dispuesto de tres reguladores de caudal (7) en paralelo con el fin de disminuir las pérdidas en la instalación. El fluido pasa a través de cada una de las electroválvulas (3) a una velocidad que depende de la electroválvula accionada ya que están conectadas a las diferentes bombas. Cada electroválvula está controlada por medio de un pulsador manual y permite la circulación del fluido impulsado por la bomba correspondiente. La combinación de las electroválvulas es la que permite a la instalación proporcionar las distintas velocidades al pistón con el fin de generar diferentes velocidades de cizalla para así obtener el reograma del producto. Las diferentes velocidades que puede adoptar el pistón extrusor se muestran en la tabla (5.5), así como las distintas combinaciones de las bombas que dan lugar a dichas velocidades. Las válvulas de secuencia variable (10) se instalan por medidas de seguridad. La electroválvula (2) controla el movimiento del pistón dentro del cilindro hidráulico cuyas bobinas se activan por medio del cuadro eléctrico mostrado en la figura (5.9). Los finales de carrera colocados en el cilindro están conectados con la instalación eléctrica con el fin de controlar la electroválvula (2) electrónicamente y por tanto al pistón.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

CAPITULO 6. MEDIDA DE LA VISCOSIDAD
CON EL REÓMETRO

6.1 MEDIDA DE LA VISCOSIDAD CON EL REOMETRO

En este apartado, se explica el modo de operación y la forma de medir y obtener el valor de los parámetros reológicos que más información nos aportan para determinar la calidad del producto objeto de estudio.

El procedimiento de obtención de resultados se divide en dos procesos:

- 1) Proceso de utilización del reómetro: Control del sistema oleohidráulico, toma de valores, análisis de los sensores y limpieza del aparato.
- 2) Procesado de resultados para determinar los parámetros reológicos del producto.

6.1.1 Procedimiento de utilización del reómetro.

Se introduce el producto que va a ser objeto de estudio en el interior del cilindro ocupando aproximadamente la mitad del volumen del cilindro para comenzar el proceso de extrusión y toma de datos. Para mayor conocimiento de las características del material se deben repetir los ciclos extrusores a diferentes velocidades teniendo en cuenta la limpieza del aparato como acción posterior al término de cada ciclo. El operario encargado en medir la muestra de producto tendrá acceso a un panel eléctrico en el que tendrá la posibilidad de controlar el sistema oleohidráulico; concretamente controlará las posibles velocidades de trabajo. Como se explicó en el capítulo anterior, dicho sistema consta de 3 bombas que generan unas determinadas velocidades del pistón extrusor con la posibilidad de combinar esas velocidades entre sí. De esta manera podemos optar a trabajar con 7 velocidades distintas (todas las combinaciones posibles de las bombas). El operario deberá hacer la prueba de extrusión con diferentes velocidades con el fin de obtener mayores datos con los que realizar las gráficas, esfuerzo de cizalla con respecto a la velocidad de cizalla τ vs $\dot{\gamma}$ y esta última con respecto a la viscosidad η vs $\dot{\gamma}$.

El sensor LVDT transmite la información de desplazamiento del pistón en todo momento, que será registrado por el data logger para diferentes instantes de tiempo según la frecuencia de medida ajustada. Así, se obtiene un valor preciso de la velocidad del pistón a lo largo de toda la carrera de extrusión.

El pistón realizará la acción extrusora sobre la muestra y el sensor de presión situado a la entrada del tubo capilar generará una señal eléctrica proporcional que será registrado también por el data logger para así determinar el *esfuerzo de cizalla*.

La temperatura del producto durante la extrusión también será registrada mediante el data logger por medio del termómetro infrarrojo dispuesto en la entrada del capilar.

Una vez terminada la extrusión del material de prueba se deberá proceder a la limpieza del aparato para asegurar la precisión en la siguiente muestra que será esta vez a una velocidad distinta. Para ello, desenroscamos la parte inferior del cilindro para, de esta forma, dividir la zona de limpieza en dos:

- el cilindro propiamente dicho
- el capilar

Una vez realizada la limpieza del aparato, se procede de nuevo a enroscar la parte inferior del cilindro para comenzar con la siguiente medición que se hará exactamente igual que la anterior excepto por la variación de la velocidad del pistón, por lo que el operario debe indicar al sistema oleohidráulico que el proceso ahora se realizará con la velocidad 2. El operario pulsará el botón “2” y el sistema impulsor del pistón trabajará a distinta velocidad, se tomarán y almacenarán de nuevo los datos en el interior del cilindro: la velocidad, presión a la entrada del capilar y temperatura del proceso para luego hallar los nuevos valores de velocidad y esfuerzo de cizalla y tener de esta forma mas información para elaborar el reograma.

Debido a lo explicado anteriormente, para un buen estudio del producto de la empresa, el operario debe conseguir varios valores de presión y velocidad en el momento de la

extrusión. Para ello el mecanismo es muy sencillo, donde no se exige ninguna preparación por parte del trabajador. Todo se traduce a:

- a) Pulsar los botones del panel eléctrico para proponer una velocidad constante del pistón
- b) Almacenar los valores numéricos aportados por los distintos sensores del reómetro.
- c) Limpiar el aparato en cada ciclo
- d) Realizar las mismas operaciones a distintas velocidades de extrusión

En resumen, el operario deberá ir variando la velocidad de cizalla y anotando los valores otorgados por los sensores.

Si se realiza la misma operación con toda la gama de velocidades que puede proporcionar el sistema oleohidráulico tendremos almacenado en el ordenador, todo lo necesario para hacer un estudio de la pólvora en cuestión, con siete velocidades de cizalla y siete valores de esfuerzo cortante.

Propondremos el reograma y el intervalo de confianza en el cual se encontrarán las futuras muestras.

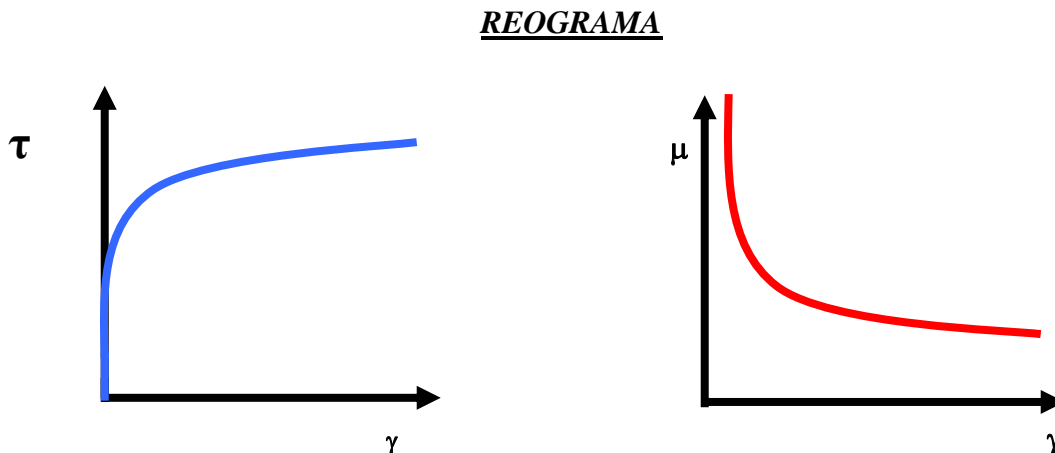


Figura 6.1. Reograma para estudio del producto.

6.1.2 Procedimiento de cálculo de los parámetros reológicos

En este apartado se explica el proceso a seguir para, a partir de los valores de desplazamiento, temperatura y presión en función del tiempo obtener la velocidad del pistón, la velocidad de cizalla y el esfuerzo de cizalla para obtener el reograma del producto y por tanto su comportamiento reológico.

Como se definió anteriormente, la *tensión de cizalla* en la pared interior cilíndrica del capilar de extrusión del reómetro es,

$$\tau = \frac{\Delta P \cdot R}{2L} \quad (6.1)$$

Siendo, τ , la tensión de cizalla (Pa), R , el radio del capilar (m), L , la longitud del capilar (m) y ΔP , la diferencia de presiones entre la entrada y la salida (Pa) (en la salida en este caso, la presión atmosférica).

La *velocidad de cizalla* se obtiene mediante la ecuación mediante la ecuación (6.2) a partir de la ecuación de cantidad de movimiento para flujo laminar en conductor de sección circular.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4V_p R_p^2}{R^3} = \quad (6.2)$$

Siendo, R , el radio del capilar (m), L , longitud del capilar (m), R_p , el radio del pistón (m), V_p , la velocidad de bajada del pistón (constante) (m/s) y Q es el caudal que pasa a través del capilar (m^3/h).

La velocidad de cizalla en fluidos Newtonianos varía linealmente con τ pero en fluidos No Newtonianos (pólvora) esta relación no es lineal y se denomina velocidad de cizalla aparente; por lo que al relacionar los dos términos anteriores se obtiene la viscosidad aparente, η ,

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\Delta P \cdot R}{2L\dot{\gamma}} \quad (6.3)$$

$$\eta = \frac{\pi \cdot P \cdot R^4}{8L \cdot Q} = \frac{\Delta P \cdot R^4}{8L \cdot V_p R_p^2} \quad (6.4)$$

Para obtener la viscosidad real se aplican una serie de correcciones. En el siguiente apartado se describen los modelos mas utilizados para tener en cuenta tanto las pérdidas en la entrada del capilar como para tener en cuenta el comportamiento no lineal del producto.

$$\eta^* = \frac{\tau^*}{\dot{\gamma}^*} \quad (6.5)$$

siendo, η^* , la viscosidad aparente real (Pa·s), τ^* , la tensión de cizalla corregida (Pa) y $\dot{\gamma}^*$, la velocidad de cizalla corregida (s^{-1})

6.1.2.1. Correcciones

Las distintas correcciones que debemos aplicar a los distintos parámetros reológicos son las siguientes:

6.1.2.1.1 Corrección para tener en cuenta las pérdidas en la contracción.

La corrección de Bagley es utilizada para corregir τ y tiene en cuenta los efectos de la caída de presión en la contracción y en el y a través del total de la longitud del tubo capilar. Bagley asume que se puede representar la caída de presión adicional en la entrada mediante una longitud equivalente adicional del tubo, “e”:

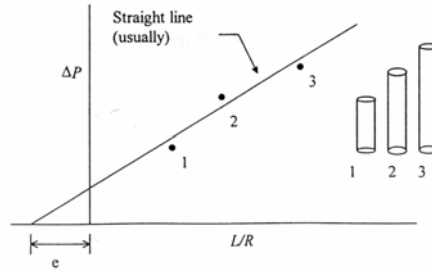


Figura 6.2. Corrección de Bagley

Esta longitud adicional se determina realizando ensayos con tres o cuatro tubos capilares y correlacionando gráficamente los resultados ΔP contra L/R .

La tensión de cizalla debe ser corregida mediante la ecuación (5.13)

$$\tau^* = \frac{\Delta P}{2 \left(\frac{L}{R} + e \right)} \quad (6.6)$$

Donde, e , es un valor obtenido de hacer la grafica $\Delta P_{\text{Pistón}}$ contra (L/R) en la intersección de la recta obtenida con el eje de las abscisas.

6.1.2.1.2 Corrección por comportamiento no lineal.

Para la verdadera velocidad de cizalla se puede utilizar la corrección d Rabinowitsch, ecuación (6.7)

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln Q}{d \ln \tau_w} \right) = \dot{\gamma} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln Q}{d \ln \tau^*} \right) \quad (6.7)$$

Para obtener la velocidad de cizalla corregida se debe representar gráficamente Q en función de τ_w en ejes logarítmicos y evaluar la derivada $\frac{d \ln Q}{d \ln \tau^*}$ para cada punto de la curva haciendo, $\frac{d \ln Q}{d \ln \tau^*} = \frac{1}{n}$, la ecuación (5.4) se puede escribir como (5.15)

También:
$$\gamma_w^* = \gamma_w \frac{3n+1}{4n} \quad (5.15)$$

6.1.2.1.3 Corrección por deslizamiento

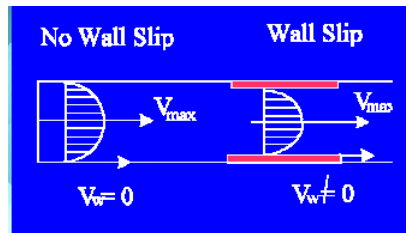


Figura 5.9. Deslizamiento en la pared

Un supuesto fundamental en la mayoría de estudios reológicos es que la velocidad del fluido en la pared es nula.

El deslizamiento puede ocurrir en sustancias como el PVC, el HDPE y algunos polímeros catalizados.

Es difícil de medir pudiendo aproximar su resultado usando la reometría capilar. El deslizamiento en la pared afecta también a la nitroguanidina y a los lubricantes. En el reómetro propuesto, esta corrección no tiene tanta importancia como las anteriores.

6.1.2.1.4 Medidas extensionales (para el cálculo del número de Trouton y medidas extensionales)

$$\eta_e = \frac{9(n+1)^2 (\Delta P)^2}{32\eta \dot{\gamma}} \quad (5.18)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4\eta \dot{\gamma}}{3(n+1)\Delta P} \quad (5.19)$$

Donde:

- η_e : viscosidad aparente extensional

Con estas ecuaciones podríamos obtener otras características para la muestra pero no es algo que nos incumba en este trabajo.

El número de Trouton para los fluidos Newtonianos es igual a 3 pero para los fluidos No Newtonianos es mayor.

$$\mu_e = 3\mu \quad (5.20)$$

Donde:

- μ_e es la viscosidad extensional y
- μ la viscosidad de cizalla



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

I.T.I. ESP. MECÁNICA

PLANOS



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

REFERENCIAS BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

The Rheological Properties of Plasticized Nitrocellulose as a Function of Nitrocellulose Precursor.; F.S. Baker, M. Healey and G. Privett (1988)

Ascanio. G., Carreau P.J., Brito-De La Fuente E. y Tanguy P.A.. Orifice Flowmeter for Measuring Extensional Rheological Properties (2002). The Canadian Journal of Chemical Engineering, Volume 80, December 2002

“The effect of processing variables on the internal flow of a triple base gun propellant dough”, escrito por R.C Warren (1988)).

Chhabra, R. P. *Non-Newtonian flow: fundamentals and engineering applications* ISBN: 9780750637701 Oxford ; Boston, MA : Butterworth-Heinemann, 1999.

King, R. P. *Introduction to practical fluid flow*. ISBN: 9780750648851 Oxford ; Boston : Butterworth-Heinemann, 2002.

Siginer, D.A . De Kee, R.P. Chhabra *Advances in the flow and rheology of non-newtonian fluids* ISBN: 0-444-82679-3080: Amsterdam, Elsevier, 1999

Introduction to Rheology. <http://www.eng.uc.edu/>

D. Della Valle, P.A. Tanguy, P.J. Carreau, Characterization of the extensional properties of complex fluids using an orifice flowmeter, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 94 (2000) 1–13

C.J.S. Petrie. Extensional viscosity: A critical discussion. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 137 (2006) 15–23

A.H. Wagner, D. M. Kalyon, R.Yazici, and T.J. Fiske. Extensional Flow of Engineering Plastics with Glass Fibers. Highly Filled Materials Institute. Stevens Institute of Technology.

T.A Jankowski, E. N Schmierer, F.C Prenger, S.P Ashworth. A series pressure drop representation for flow through orifice tubes. Journal of Fluids Engineering, 130 (2008) 051204-1, 051204-7

ISO 1133. Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and the melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics

http://www.polydynamics.com/Role_of_Rheology_in_Extrusion.PDF

Barnes, H.A.; Hutton, J.F.; Walters, K. An Introduction to Rheology. Elsevier, Amsterdam, 1989.

Darby, R. Chemical Engineering Fluid Mechanics. En cap. 1-2, Marcel Dekker, Inc. New York, 1996.

Macosko, C. Rheology: Principles and Measurements. En cap. 1 a 3, VCH Publishers, Inc., New York, 1994.

Walters, K. Rheometry. En cap. 1, Chapman and Hall, Londres, 1975.

Binding, D.M., “An Approximate Analysis for Contraction and Converging Flows”, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 27, 173-189 (1988).

Binding, D.M. and K. Walters, “On the Use of Flow through a Contraction in Estimating the Extensional Viscosity of Mobile Polymer Solutions”, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 30, 291–298 (1988).

Boger, D.V. and R.J. Binnington, “Circular Entry Flows of Fluid M1”, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 35, 339–360 (1990).

Cogswell, F.N., “Converging Flow of Polymer Melts in Extrusion Dies”, Polym. Eng. Sci. 12, 64–73 (1972).

Cohu, O. and A. Magnin, “Rheometry of Paints with Regard to Roll Coating Process”, J. Rheol. 39, 767–785 (1995).

Della Valle, D., P.A. Tanguy and P.J. Carreau, “Characterization of Extensional Properties Fluids Using an Orifice Flowmeter”, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 94, 1–13 (2000).

Trouton, F.T., “On the Coefficient of Viscous Traction and its Relation to that of Viscosity” Proc. R. Soc. 77, 426–440 (1906).

Shear Viscosity, Extensional Viscosity, and Die Swell of Polypropylene in Capillary Flow with Pressure Dependency
JAN-CHAN HUANG, KIM-SWEET LEONG (2001)

Simulación y validación del flujo de polímero a través de un dado capilar; Rafael Mejía Arce y Jorge A. Medina Perilla
Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería. Facultad de los Andes Colombia.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

ANEXO I
GLOSARIO DE TERMINOS

GLOSARIO DE TERMINOLOGÍA REOLÓGICA

ADHESION (Adhesion). La fuerza que resiste la separación de dos cuerpos que están en contacto.

AGREGADO (Aggregate). Un grupo de partículas mantenidas juntas

ANISOTRÓPICO (Anisotropic). Dícese de aquellos cuerpos en los que la magnitud de la propiedad de la que se trate no es la misma en todas las direcciones.

BLANDURA (Softness). Tendencia a deformarse fácilmente

CAÍDA DE FLUENCIA (Yield drop). Es la magnitud de una disminución abrupta en el esfuerzo en el punto de fluencia inferior después de haberse alcanzado el punto de fluencia superior en una curva de esfuerzo frente a deformación.

CAPACITANCIA (Compliance). El cociente entre la deformación y su correspondiente esfuerzo. El recíproco del módulo de elasticidad.

CAPACITANCIA DE ALMACENAMIENTO (Storage compliance). El cociente entre la parte de la deformación en fase con el esfuerzo y el esfuerzo, en condiciones sinusoidales.

CAPACITANCIA COMPLEJA (Complex compliance). La expresión matemática de una capacitancia considerada como la suma de una parte real y otra imaginaria. La parte real se denomina a veces capacitancia de almacenamiento y la parte imaginaria capacitancia de pérdida.

CAPACITANCIA DE PÉRDIDA (Loss compliance). La parte imaginaria de la capacitancia compleja.

CIRCULO DE MOHR (Mohr Circle). Un nomograma que facilita el cálculo de la deformación de cizalla producida por los esfuerzos de tracción que actúan sobre cualquier sección plana de un cuerpo elástico sometido a un esfuerzo normal uniaxial, es decir, un cilindro en tracción.

CIZALLA PURA (Pure shear). Una cizalla que no va acompañada de rotación del elemento a la que se le aplica.

CIZALLA SIMPLE (Simple shear). Una cizalla producida por el desplazamiento relativo paralelo de planos paralelos (Véase flujo viscosimétrico).

PFC. Diseño de un reómetro capilar de extrusión

COEFICIENTE DE FLUIDEZ (Coefficient of fluidity). Recíproco del coeficiente de viscosidad dinámica.

COEFICIENTE DE FRICCIÓN (Friction coefficient). La razón de la fuerza de fricción a la componente normal del peso de un sólido que se desplaza.

COEFICIENTE DE INTERACCIÓN (Interaction coefficient). Una serie de coeficientes de un polinomio que expresa los valores de la viscosidad intrínseca con diferentes potencias de la concentración, de los que la constante de Huggins es el primero.

COEFICIENTE DE VISCOSIDAD (Coefficient of viscosity). La razón constante del esfuerzo de cizalla a la velocidad de cizalla para flujo estacionario. Su valor es constante y característico del comportamiento del fluido newtoniano (normalmente se la denomina "viscosidad" o "viscosidad dinámica", véase también "viscosidad aparente").

COEFICIENTE DE VISCOSIDAD CRUZADA (Coefficient of cross-viscosity).

Coeficiente de esfuerzos normales de segundo orden en un modelo de fluido de Reiner-Rivlin. Estrictamente no es una viscosidad.

COEFICIENTE DE VISCOSIDAD INTERFACIAL (Coefficient of interfacial viscosity). La razón constante del gradiente de una fuerza, que actúa en el plano de la interfase, a la velocidad de cizalla en el mismo plano para flujo estacionario. Sus dimensiones son las de viscosidad por longitud.

COEFICIENTE DE VISCOSIDAD EN TRACCIÓN (Coefficient of viscous traction). La razón constante del esfuerzo de tracción a la velocidad de alargamiento, aplicado al modelo de fluido newtoniano.

COHESIÓN (Cohesion). La atracción entre las moléculas o las partículas que forman la masa de un líquido o un sólido.

COMPRESIBILIDAD (Compressibility). a) La disminución relativa de volumen producida por un aumento de la presión, b) El recíproco del módulo de compresión.

CONDUCTA ELÁSTICA IDEAL (Ideally elastic behaviour). Conducta elástica sin histéresis

CURVA DE FLUJO (Flow curve). La curva que representa el esfuerzo frente a la velocidad de deformación.

CURVA DE WOHLER (Wohler curve). La curva que representa la amplitud del esfuerzo frente al logaritmo del número de ciclos necesarios para la fractura de una probeta de ensayos de fatiga. También se denomina curva S/N.

DEFORMACIÓN (Strain). La medida de la deformación respecto a la dimensión de referencia (longitud, área o volumen). También se denomina deformación relativa.

DEFORMACIÓN (Deformation). Acción y efecto de un cambio de forma, de volumen o de ambos.

DEFORMACIÓN DE CAUCHY (Cauchy strain). La razón de una extensión lineal a su longitud original.

DEFORMACIÓN DE CIZALLA (Shear strain). La deformación relativa durante un proceso de cizalla; este término se describe a veces abreviadamente como cizallamiento.

DEFORMACIÓN PERMANENTE (Permanent deformation, set). La deformación que permanece después de retirar el esfuerzo que la produjo.

DEFORMACIÓN RELATIVA (Relative deformation). La razón entre el incremento de deformación y la dimensión de referencia (longitud, área o volumen). También se denomina deformación (strain).

DEFORMACIÓN RESIDUAL (Residual deformation). La deformación que permanece después de cesar un esfuerzo externo.

ECUACIÓN CONSTITUTIVA (Constitutive equation). Una ecuación que relaciona el esfuerzo, la deformación, el tiempo y también a veces otras variables como la temperatura. También se denomina ecuación reológica de estado.

ECUACIÓN DE ESTADO (Equation of state). Véase ecuación constitutiva y ecuación reológica de estado.

ECUACIONES DE NAVIER-STOKES (Navier-Stokes equation). Las ecuaciones de movimiento para un modelo de fluido Newtoniano que describen el balance entre la fuerza de inercia, la fuerza de presión, la fuerza viscosa y cualesquiera fuerzas del modelo.

EFFECTO ELÁSTICO RETARDADO (Elastic after-effect). El retraso, producido por fuerzas viscosas, que se observa cuando se recupera una deformación elástica.

EFFECTO ELECTROVISCOSO (Electroviscous effect). Efectos eléctricos que influyen sobre la viscosidad: a) causados por partículas en suspensión cargadas, b) causados por la aplicación de un campo eléctrico exterior.

ESFUERZO (stress). La fuerza por unidad de área.

ESFUERZOS CONGELADOS (Frozen-in stress). Véase esfuerzos residuales

ESFUERZO DE CIZALLA EXTRAPOLADO (Extrapolated shear stress). La intercepción con el eje de esfuerzos, de la extrapolación de la parte superior lineal de una curva de flujo.

ESFUERZO DE CIZALLA (Shear stress). La componente del esfuerzo paralela (o tangencial) al área considerada. Véase esfuerzo tangencial.

PFC. Diseño de un reómetro capilar de extrusión

ESFUERZO DE FLUENCIA (Yield Btress). El esfuerzo correspondiente al punto de fluencia.

ESFUERZO DE FLUJO (Flow stress). El menor esfuerzo, bajo tracción o cizalla, necesario para inducir el flujo plástico de un material.

FACTOR DE FRICCIÓN (Friction factor). Es la razón del esfuerzo de cizalla en la pared de una tubería a la densidad de energía cinética del flujo en la tubería. En flujo laminar vale $64/Re$ si el número de Reynolds (Re) se refiere al radio hidráulico del tubo (factor de fricción de Darcy, Véase 97), y vale $16/Re$ cuando el número de Reynolds se refiere al radio real del tubo (factor de fricción de Fanning, Véase 98). En flujo turbulento, el valor del factor de fricción varía poco con el número de Reynolds, pero la rugosidad relativa del tubo tiene una gran influencia.

ESFUERZO DE FLUENCIA (Yield stress). El esfuerzo correspondiente al punto de fluencia.

ESFUERZO DE FLUJO (Flow stress). El menor esfuerzo, bajo tracción o cizalla, necesario para inducir el flujo plástico de un material.

ESFUERZO DE PRUEBA (Proof stress). El esfuerzo necesario para producir una deformación permanente especificada.

ESFUERZO HIDROSTÁTICO (Hydrostatic stress). Véase esfuerzo isotrópico.

ESFUERZO ISOTRÓPICO (Isotropic stress). Un sistema de esfuerzos en el que las tres componentes normales son iguales. También denominado esfuerzo hidrostático.

ESFUERZO NORMAL (Normal stress). La componente del esfuerzo en ángulo recto con el área considerada.

ESFUERZO RESIDUAL (Residual stress). Un esfuerzo interno que no desaparece después de que se ha retirado el esfuerzo externo. Véase esfuerzo congelado.

ESFUERZO TANGENCIAL (Tangential stress) Véase esfuerzo de cizalla.

ESPEZAMIENTO POR CIZALLA (Shear thickening). Un aumento de viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla en flujo estacionario.

ESTRECHAMIENTO (Neecking). La reducción local del área transversal de una probeta sometida a alargamiento.

FLUIDIFICACIÓN POR CIZALLA (Shear thinning). Una reducción de viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla en flujo estacionario (Véase pseudoplasticidad y tixotropía). También denominada viscosidad estructural y reducción temporal de viscosidad.

FLUIDO AVISCOSO (Inviscid fluid). Un fluido idealizado cuya viscosidad no tiene efecto sobre el problema que se considere.

FLUJO DE COUETTE (Couette flow). Flujo de cizalla en el ánulo comprendido entre dos cilindros coaxiales en rotación relativa. También se denomina flujo circular de Couette (Véase flujo plano de Couette).

FLUJO CIRCULAR DE COUETTE (Circular Couette flow). Flujo de cizalla en el ánulo existente entre dos cilindros coaxiales en rotación relativa, con frecuencia se utiliza sin el adjetivo circular (Véase flujo de Couette y flujo plano de Couette).

FLUJO DE COUETTE PLANO (Plane Couette flow). Cizalla simple entre platos paralelos en movimiento relativo (Véase flujo de Couette circular).

FLUJO DE PISTÓN (Plug flow). Movimiento en el interior de un tubo de un material con una zona central de gradiente de velocidad cero.

FLUJO DE POISEUILLE (Poiseuille flow). Flujo laminar en un tubo de área transversal circular bajo un gradiente de presión constante.

FLUJO LAMINAR (Laminar flow). Flujo sin turbulencia.

FLUJO NO-NEWTONIANO (non-Newtonian flow). Cualquier flujo laminar que no está caracterizado por las ecuaciones de Navier-Stokes.

FLUJO PLÁSTICO (Plastic flow). El flujo que acontece por encima del esfuerzo del punto de fluencia.

GRADIENTE DE VELOCIDAD (Velocity gradient). La derivada de la velocidad de un fluido con respecto a una coordenada espacial.

HEMORREOLOGIA (Haemorheology). La reología de la sangre, de sus componentes y de las venas y arterias.

HILABILIDAD (Spinnability). Capacidad de un líquido para formar hilos extendidos estables.

HINCHAMIENTO A LA SALIDA (Die swell, Barus effect, Merrington effect). El aumento de volumen posterior a la salida de la extrusora.

HISTÉRESIS. La propiedad de un material de tomar valores distintos de respuesta a partir del valor del estímulo en el que se invierte el sentido del mismo.

NOTA: En reología se aplica, en general, a funciones esfuerzo/deformación o esfuerzo/velocidad de deformación. En su representación gráfica aparece un punto de retroceso.

ÍNDICE DE VISCOSIDAD (VI) (Viscosity index). Un valor en una escala arbitraria, utilizado para mostrar la magnitud de los cambios de viscosidad en los aceites lubricantes al cambiar la temperatura.

LÍQUIDO (Liquid). Aquella fase de la materia que fluye aún bajo esfuerzos de cizalla casi nulos de manera que en último término toma la forma del recipiente que lo contiene hasta un cierto nivel, definido y horizontal que se conoce por superficie del líquido.

LÍMITE ELÁSTICO (Elastic limit). El punto de la curva de esfuerzo deformación en el que comienza la deformación plástica; se puede especificar en términos de esfuerzo o de deformación.

LÍMITE DE FATÍGA (Fatigue limit). El mayor valor de la amplitud de esfuerzo o deformación periódicos, que no da lugar a fractura cuando se aplica indefinidamente el estímulo (1 a 5 millones de ciclos en la práctica).

LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATÍGA (Endurance limit). Véase resistencia a la fatiga.

MACRORREOLOGÍA (Macrorheology). La reología que trata un material como un continuo sin consideración explícita de su microestructura. También se denomina reología del continuo y reología fenomenológica.

MICRORREOLOGÍA (Microrheology). La reología que toma en cuenta la microestructura de los materiales.

MODELO DE BINGHAM (Bingham model). El que cuantifica la conducta de un sólido elástico hasta el esfuerzo de fluencia (yield stress); por encima del es fuerza de fluencia la velocidad de cizalla es directamente proporcional al esfuerzo de cizalla menos el esfuerzo de fluencia.

MODELO DE BURGESS (Burgess model). El que cuantifica una combinación en serie de un modelo de Kelvin y un modelo de Maxwell.

MODELO DE FLUIDO GREEN-RIVLIN (Green-Rivlin fluid model). Una ecuación constitutiva integral general para viscoelasticidad

MODELO DE FLUIDO SEGÚN LA LEY DE LA POTENCIA (Power-law fluid model). El que cuantifica el flujo de cizalla simple por una relación lineal entre el logaritmo del esfuerzo de cizalla y el logaritmo de la velocidad de cizalla.

MODELO DE FLUIDO REINER-RIVLIN (Reiner-Rivlin fluid model). Un modelo matemático de un fluido sin elasticidad en el que el esfuerzo es una función no lineal de la velocidad de deformación.

MODELO DE FLUIDO RIVLIN-ERICKSEN (Rivlin-Ericksen fluid model).

Un modelo caracterizado por una ecuación constitutiva diferencial general para representar la conducta viscoelástica.

MODELO DE FLUIDO NEWTONIANO (Newtonian fluid model). Un modelo caracterizado por un valor constante del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad

de cizalla, en flujo de cizalla simple y con diferencias nulas de esfuerzos normales (Véase amortiguador).

MODELO DE FLUIDO SIMPLE (Simple fluid model). Un modelo de fluido para el cual el esfuerzo en cualquier instante está determinado por la historia de la deformación.

MODELO DE FLUIDO NEWTONIANO (Newtonian fluid model). Un modelo caracterizado por un valor constante del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla, en flujo de cizalla simple y con diferencias nulas de esfuerzos normales (Véase amortiguador).

MODELO DE FLUIDO SIMPLE (Simple fluid model). Un modelo de fluido para el cual el esfuerzo en cualquier instante está determinado por la historia de la deformación.

MODELO DE HOOKE (Hooke model). Un modelo que representa la ley de Hooke de la elasticidad, es decir, un resorte.

MODELO DE KELVIN (Kelvin model). Un modelo compuesto por un modelo de Hooke y un modelo de fluido newtoniano en paralelo. También denominado Modelo de Voigt.

MODELO DE MAXWELL (Maxwell model). Es el formado por un modelo de Hooke y un modelo de fluido Newtoniano en serie.

MODELO DE SAINT-VENANT (St. Venant model). Un modelo que describe un material que es rígido para esfuerzos menores que un cierto valor, a partir del cual fluye, a veces se le representa por un cuerpo sólido sobre una superficie plana (deslizador).

Un modelo viscoelástico consistente en un modelo de Kelvin en serie con un modelo de Hooke o, alternativamente, un modelo Maxwell en paralelo con un modelo Hooke.

NÚMERO DE DEBORAH (Deborah number). a) La razón del tiempo de relajación de una sustancia a la duración de la observación. b) La relación entre una característica de tiempo de la sustancia y un tiempo característico de la observación.

PFC. Diseño de un reómetro capilar de extrusión

NÚMERO DE REYNOLDS (Reynolds number). El producto de una longitud típica y una velocidad del fluido típica, dividido por la viscosidad cinemática del fluido. Expresa la relación de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas.

PÉRDIDA PERMANENTE DE VISCOSIDAD (Permanent viscosity loss).

La disminución irreversible de la viscosidad inducida por el esfuerzo de cizalla.

PERFIL DE VELOCIDAD (Velocity profile). La distribución de velocidad en un área transversal normal a la dirección de flujo.

PUNTO DE FLUENCIA (Yield point). El punto en la curva de esfuerzo/deformación o esfuerzo/velocidad de deformación, que corresponde a la transición de la deformación elástica a la plástica (Véase punto de fluencia inferior). También se denomina punto de fluencia superior.

Para los no-metales, que se comportan aproximadamente como un modelo de Bingham, es el punto en el que la curva que representa el esfuerzo de cizalla frente a la velocidad de deformación en cizalla, se cruza con el eje de los esfuerzos.

REOLOGÍA (Rheology). La ciencia del flujo y la deformación de la materia.

REOLOGÍA DEL CONTINUO (Continuum rheology). La reología que trata una sustancia como un continuo, sin consideración explícita de su microestructura. También se le denomina macrorreología y reología fenomenológica.

REOLOGÍA FENOMENOLÓGICA (Phenomenological rheology). La reología que trata a un material como un continuo, sin consideración explícita de su microestructura. También se denomina reología del continuo y macrorreología.

REOGONIÓMETRO (Rheogoniometer). Un reómetro diseñado para medir las componentes de la deformación de cizalla y también la normal de un tensor de esfuerzo.

REOGRAMA (Rheogram). Un gráfico de una relación reológica.

REOMALAXIA (Rheomalaxis). Una pérdida irreversible de consistencia producida por la deformación de un material que se cizalla.

REÓMETRO (Rheometer). Un instrumento para medir propiedades reológicas.

REOPEXIA (Rheopexy). a) la aceleración de la solidificación de una sustancia tixotrópica por movimientos suaves y regulares. b) Véase tixotropia negativa.

NOTA: La definición a) se dio en 1936 al descubrir el fenómeno, pero desde 1955 la definición b) ha prevalecido.

STOKES (ST) (Stokes). La unidad CGS de viscosidad cinemática $1 \text{ St} = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$

SUPERFLUIDEZ (Superfluidity). El flujo sin fricción de algunos materiales, por ejemplo, helio líquido II por debajo de 2.

TENSIÓN (Tension). Una fuerza normal a la superficie sobre la que actúa y dirigida hacia el exterior del cuerpo.

TENSOR DE ESFUERZO (Stress tensor). Una matriz de los componentes de la deformación de cizalla y el esfuerzo normal, que representa el estado del esfuerzo en un punto de un cuerpo.

TIEMPO DE RELAJACIÓN (Relaxation time). El tiempo necesario para que, en un modelo Maxwell, el esfuerzo disminuya a e^{-1} de su valor inicial bajo deformación constante. Muchos materiales poseen una multiplicidad de tiempos de relajación.

TIEMPO DE RETARDO (Retardation time). El tiempo necesario para que en un modelo Kelvin la deformación disminuya a e^{-1} de su valor original después de retirar el esfuerzo. Muchos materiales poseen una multiplicidad de tiempos de retardo.

TIXOTROPÍA (Thixotropy). Una disminución en la viscosidad aparente, por la acción de esfuerzos de cizalla, seguida de una recuperación gradual cuando se retira el esfuerzo. El efecto es función del tiempo (Véase pseudoplasticidad).

TIXOTROPÍA NEGATIVA (Negative thixotropy). Un aumento de la viscosidad aparente bajo esfuerzo de cizalla, seguido de una recuperación gradual cuando se retira el esfuerzo. El efecto es función del tiempo (Véase dilatancia); Véase también reopexia.

TRIBOLOGÍA (Tribology). La ciencia y tecnología de superficies interactuantes en movimiento relativo, y de temas y prácticas relacionada con ello.

TURBULENCIA (Turbulence). Una condición de flujo en la que las componentes de la velocidad muestran variación al azar.

VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN CIZALLA (Rate of shear). El cambio de la deformación de cizalla por unidad de tiempo. Abreviadamente se le suele llamar velocidad de cizalla.

VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN (Rate of strain). El cambio de la deformación por unidad de tiempo.

VISCOELASTICIDAD LINEAL (Linear viscoelasticity). Viscoelasticidad caracterizada por una relación lineal entre el esfuerzo, la deformación y la derivada con respecto al tiempo de la deformación.

VISCOSIDAD (Viscosity). a) Cualitativamente es la propiedad de un material de resistir la deformación de manera creciente a medida que crece la velocidad de deformación. b) Cuantitativamente es una medida de esta propiedad definida como el cociente entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla en flujo estacionario. Frecuentemente se utiliza como sinónimo de viscosidad aparente o coeficiente de viscosidad.

NOTA. Se han definido las siguientes viscosidades: viscosidad aparente, viscosidad de área, viscosidad de compresión coeficiente de viscosidad cruzada, coeficiente de viscosidad

interfacial, coeficiente de viscosidad, coeficiente de tracción viscosa, viscosidad compleja, viscosidad cruzada, viscosidad diferencial, viscosidad dinámica, elastoviscosa, liquido

elastoviscoso (Véase liquido elástico), efecto electroviscoso, viscosidad de tracción, viscosidad inherente, viscosidad interfacial, viscosidad intrínseca, viscosidad cinemática, número de viscosidad limite, número de viscosidad logarítmico, pérdida de viscosidad permanente, viscosidad plástica, viscosidad reducida, viscosidad relativa, viscosidad específica, viscosidad estructural, viscosidad superficial, reducción temporal de viscosidad, viscosidad de Trouton, viscoelasticidad, relación viscosidad/densidad, incremento de viscosidad, índice de viscosidad, número de viscosidad, relación de viscosidad, viscosidad de volumen.

VISCOSIDAD APARENTE (Apparent viscosity). La razón del esfuerzo de cizalla a la velocidad de cizalla, si depende de la velocidad de cizalla.

VISCOSIDAD CINEMÁTICA (Kinematic viscosity). El cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del material, ambas medidas a la misma temperatura.

VISCOSIDAD COMPLEJA (Complex viscosity). La expresión matemática de la viscosidad como la suma de una parte real y otra imaginaria. La parte real se denomina corrientemente viscosidad dinámica y la parte imaginaria está relacionada con la parte real del módulo complejo.

VISCOSIDAD DE ÁREA (Area viscosity). La propiedad de una interfase de resistir progresivamente un cambio isotrópico en área, que aumenta con la velocidad de cambio

VISCOSIDAD DE COMPRESIÓN (Bulk viscosity). La viscosidad asociada con los cambios de volumen, es decir el cociente entre el esfuerzo isotrópico y la velocidad de deformación de volumen.

VISCOSIDAD DIFERENCIAL (Differential viscosity). La derivada del esfuerzo con respecto a la velocidad de deformación en cizalla simple.

VISCOSIDAD DINÁMICA (Dynamic viscosity). a) Un sinónimo del coeficiente de viscosidad, utilizado para distinguirlo de la viscosidad cinemática. El recíproco de la

fluidez b) La relación entre el esfuerzo en fase con la velocidad de deformación y la velocidad de deformación bajo sollicitación sinusoidal.

VISCOSIDAD ESPECÍFICA (Specific viscosity). La diferencia entre la viscosidad dinámica de una disolución o dispersión y la del disolvente o fase continua, dividida por la viscosidad dinámica del disolvente o fase continua, medidas a la misma temperatura.

VISCOSIDAD INHERENTE (Inherent viscosity). El logaritmo natural de la razón de la viscosidad relativa a la concentración del soluto o de la fase dispersa. Se denomina también número de viscosidad logarítmico.

VISCOSIDAD INTERFACIAL (Interfacial viscosity). La propiedad de una interfase de resistir la deformación de cizalla, en el plano de la interfase, de manera creciente a medida que crece la velocidad de deformación. Se usa corrientemente como medida de esta propiedad. También denominada viscosidad de superficie. Véase 12.

VISCOSIDAD INTRÍNSECA (IV) (Intrinsic viscosity IV). El valor extrapolado a concentración nula de la viscosidad reducida. También se denomina número de viscosidad límite.

VISCOSIDAD PLÁSTICA (Plastic viscosity). Para un modelo de Bingham es el exceso del esfuerzo de cizalla sobre el esfuerzo que produce la fluencia, dividido por la velocidad de cizalla. El recíproco de la movilidad.

VISCOSIDAD POR TRACCIÓN O DE TROUTON (Elongational viscosity - Trouton viscosity). El cociente entre el esfuerzo de tracción y la deformación de tracción (alargamiento).

VISCOSIDAD REDUCIDA (Reduced viscosity). La viscosidad específica (por unidad de concentración del soluto) o de la fase dispersa. Véase número de viscosidad.

VISCOSIDAD RELATIVA (Relative viscosity). La razón de la viscosidad dinámica de una disolución a la del disolvente, o de una dispersión a la de su fase continua, ambas medidas a la misma temperatura. Véase también relación de viscosidad.

VÓRTICES DE TAYLOR (Taylor vortices). El flujo secundario que consiste en vórtices en forma de anillo asociados con una inestabilidad de flujo circular de Couette cuando el número de Taylor excede cierto valor.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

ANEXO II
MEJORAS APLICABLES AL REOMETRO

MEJORAS APLICABLES Y CURIOSIDADES DEL REÓMETRO

PARED CALENTADORA

Al comienzo del proyecto y estudiando el funcionamiento de reómetros con aplicación similar al que es objeto de estudio, se propuso que el cilindro dispusiera de una pared calentadora que hiciera fluir mejor el producto y la extrusión fuera más fácil. Debido a la presión que se genera en el interior del reómetro la pólvora sufre un aumento de temperatura que junto al calentamiento de las paredes del producto podría generar deflagraciones por lo que rápidamente vimos que era una medida inviable.

TRADUCTORES DE PRESIÓN EN LA CIRCUNFERENCIA

Para una mayor exactitud del esfuerzo o tensión de cizalla convendría introducir diversos sensores de presión alrededor de la circunferencia que describe el cilindro. Como mínimo cuatro para garantizar total exactitud y para que se pueda reforzar la medida por si uno de los sensores no funciona en el momento de la extrusión.

Por exigencias de la empresa en temas de espacio y dinero (al ser cada sensor Atex, se incrementa el coste), no se llevó a cabo esta mejora.

ENCODER ROTATIVO

Como se ha indicado, la velocidad del pistón debe ser constante y tener un valor conocido en todo momento. Al saber la importancia de ese valor a la hora de calcular la velocidad de cizalla, se ha utilizado un LVDT con un data logger o para obtener un valor claro y fiable de la velocidad del pistón en todo momento. Debido al buen resultado que ha alcanzado la empresa en el tanque de recuperación de ácidos y teniendo en cuenta el precio, el jefe de producción y el de mantenimiento (Gabriel Ballester y Javier Villaescusa) propusieron la utilización de un encoder rotativo. El sistema aplicado a nuestro reómetro consistiría en un hilo que se uniría a la cabeza del pistón por medio de una arandela por ejemplo. El hilo se haría pasar a través de la pared que separa el aparato de la instalación oleohidráulica uniéndose a una encoder rotativo con una pesa de compensación, o sea, según el desplazamiento del pistón giraría el mas o menos el rollo y el sensor que detecta las vueltas del rollo aplicaría un valor acorde a **NUMERO DE VUELTAS – MILIMETROS DE DESPLAZAMIENTO DEL PISTÓN**. Este sistema permite observar con fiabilidad la trayectoria del pistón y al ofrecer una salida 4-20 mA podríamos obtener la medida en un ordenador o marcador digital para su fácil lectura.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
I.T.I. ESP. MECÁNICA

ANEXO III
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS
SENSORES