

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



**“DISEÑO MECÁNICO DE UN REÓMETRO DE CILINDROS
CONCÉNTRICOS“**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

MIGUEL ANGEL BAZÁN RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GABRIEL ASCANIO GASCA

CO DIRECTOR: ING. EDUARDO BERNAL VARGAS

MÉXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Madre, este trabajo es tu cosecha de lo sembrado hace 27 años. Ahora, tienes un pendiente menos en la vida. Agradezco el esmero y dedicación para conmigo y mi hermano, esto es un pequeño reconocimiento a todo lo que significas en nuestra vida. ¡Gracias mamá, te quiero!

Chuy, eres el mejor amigo que tengo. A pesar de tener diferencias de ideas, siempre es grato el convivir contigo. Has sido un gran apoyo para mi desarrollo personal y creo que disfrutas esto al igual que yo. Gracias por ser así, tengo aún mucho que aprenderte.

Lalo, eres mi hermano menor y te toca "fletarte". Se que no hemos sido muy unidos, pero eres mi hermano y por eso mismo te quiero mucho. Deseo que esto te sirva de referencia para seguir adelante en tu propio camino.

Nancy, un suspiro me robas al iniciar este párrafo y no se ni como empezar. Son 14 años de conocernos, lo que nos vuelve viejos y grandes amigos, durante estos años te convertiste en el mejor motivador para alcanzar la meta. Fuiste una referencia para recuperar mi camino y ahora quiero caminar a tu lado para alcanzar otras metas. Te amo.

Familia Ramírez Domínguez, este trabajo está dedicado a cada uno de ustedes. Los quiero mucho aunque no lo sientan.

Mi abuelito Juan se adelantó en el camino, pero se que lo está disfrutando tanto como los demás. Abuelita Julia, gracias por abrirnos las puertas de su casa y malcriarme con tantas atenciones.

Sólo por gastar tinta y evitar sentimientos erróneos nombraré a mi familia:

Tíos: Gloria y Gabriel, Félix, Rosa y Juan, Margarita, Carmen y Raúl, María de los Ángeles "Mamá Nangeles", Verónica, Jesús y Lidia, Jesús y Gudelia, Fernando, Ana, Laura y Tonchis.

Primos: Paty, Sole, Gabo, Juancho, Leo, Chicho, Chela, Isra y Monche.

Ahijados (parte importante para salir siempre adelante): Martha y José.

Rocío, gracias por seguir compartiendo a mi tío con nosotros y por el apoyo que me has brindado dentro y fuera del CCADET, sobre todo a la hora de la comida.

Tía: te quiero mucho.

Familia Caballero Cabrera, gracias por sus muestras de cariño y el apoyo dado durante los años que llevo de conocerlos.

Una familia especial, con la que he compartido momentos de alegría y diversión, mis amigos: Patricia, Blanca, Nayhelli, Leticia, Teresa, María Luisa, Martha Elvia, Janeth, Gabriela, Viridiana, Ruperto, Armando, Hugo, Raúl y Alejandro. Espero no herir susceptibilidades si es que omití a alguno.

Agradecimientos

A la ***Universidad Nacional Autónoma de México***, por haberme permitido comenzar a soñar desde *Iniciación Universitaria* hasta la ***Facultad de Ingeniería***. Le debo lo que soy como profesional y, en parte, como ser humano.

Al ***Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET)***, por haberme dejado ser parte de su plantilla de estudiantes y desarrollar este proyecto.

Al ***Dr. Gabriel Ascanio*** por haberme dado la oportunidad de aprender de él. Por la confianza, la amistad, el apoyo y la paciencia que me ha brindado durante esta aventura.

A los integrantes del grupo de ***Ingeniería de Procesos del CCADET***, por sus consejos técnicos y de esparcimiento: Eduardo, Antonio, Javier, Julio Cesar, Igmar, Rodolfo, Juan Carlos y Servando.

Al personal del ***Taller Mecánico***, por sus conocimientos de manufactura y diseño aportados a este trabajo. Norberto Mosqueda, Alejandro Pérez, Marcos Velásquez, Juan Arenas, Daniel Ruiz, Javier Ángeles, Edgar Embriz y el Sr. Simón.

A todo el personal del CCADET donde he encontrado buenos amigos, que día a día me motivaban para concluir esta carrera. En la Dirección: Dr. Saniger, Lulú, Jorge y Galdino, en la Secretaría Académica: Gabriel y Claudia, en la Secretaría

Técnica: Jesús y Susana, en la Secretaría Administrativa: Natalia, Jaime y Enrique, en Electrónica: Ricardo Damián, en Dibujo: Luis y Jaime (alias el cuñado), en la Cuadrilla: Artemio, Jorge, Luis y Ana Lilia, en el Almacén: Luis y Sra. Elena, en Acústica: Ricardo, Antonio y Lilia, en Óptica: Asur, Blas y Valentín, en Metrología: Gerardo y Benjamín, en Computo: Antonio, Alethia, Carmen, Pedro y Rigoberto, en Personal: Rocío, Marisela y Elías, en Vinculación: Patricia y Guadalupe, en Vigilancia: Guadalupe, Sra. Carmen, Luciano, Wenceslao, Rigoberto, Román, Raúl, Olivo, Gregorio y Mauricio, en Intendencia: Facundo y Alejandro, en la Biblioteca: Sra. Guillermina, en Compras: Arturo y Eduardo, en Fotónica de microondas: José Luz, Raúl y Oliver.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	iii
INTRODUCCIÓN	v
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	
1.1 REOLOGÍA	1
1.2 VISCOSIDAD	3
1.3 TIPOS DE FLUIDOS	4
1.4 REOMETRÍA	6
1.5 CLASIFICACIÓN DE REÓMETROS	8
1.6 REÓMETROS ROTACIONALES	9
1.7 REÓMETROS COMERCIALES	10
CAPÍTULO 2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN	
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN REÓMETRO ROTACIONAL DE CILINDROS CONCÉNTRICOS	16
2.2 EFECTOS FINALES	25

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	
3.1 DESCRIPCIÓN DEL REÓMETRO ROTACIONAL	29
3.1.1 CILINDRO INTERIOR (ROTOR)	31
3.1.2 CILINDRO EXTERIOR (COPA)	32
3.1.3 COJINETE NEUMÁTICO	33
3.1.4 MOTOR Y CELDA DE CARGA	35
3.2 CALIBRACIÓN	
3.2.1 FLUIDOS DE PRUEBA	37
3.2.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN	37
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
CONCLUSIONES	43
APÉNDICE	I
REFERENCIAS	XV

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1.1 Gráficas de fluidos newtonianos y no newtonianos	5
Figura 1.2 Tipos de reómetros de corte. (a) Cilindros concéntricos; b) Cono y plato y (c) Discos paralelos	8
Figura 1.3 Tipos de reómetros de presión. (a) Capilar; (b) Flujo de contracción o entrada y (c) Flujo axial anular	9
Figura 1.4 Perfil de velocidad de flujo en sistemas de medición Searle y Couette	9
Figura 2.1 Configuración de la geometría de cilindros concéntricos	22
Figura 2.2 Tres diseños comunes para minimizar los efectos finales	26
Figura 3.1 Ensamble virtual de todos los componentes del reómetro	28
Figura 3.2 Prototipo del reómetro propuesto	29
Figura 3.3 Geometría de cilindros concéntricos bajo la norma DIN 53019/ISO 32019	30
Figura 3.4 Cilindro interior (rotor): a) Representación gráfica; b) Rotor fabricado en acero inoxidable	31
Figura 3.5 Cilindro exterior (copa): a) Representación gráfica; b) Copa fabricada en acero inoxidable	32
Figura 3.6 Parte dinámica del cojinete neumático	33
Figura 3.7 Parte estática del cojinete neumático	34
Figura 3.8 Cojinete neumático construido: (a) Parte estática; (b) Parte dinámica	34

Figura 3.9 Motor DC	35
Figura 3.10 Celda de carga	35
Figura 3.11 Multímetro donde se obtiene la lectura de fuerza (N)	36
Figura 3.12 Diagrama general del circuito electrónico	36
Figura 4.1 Curva de calibración del reómetro desarrollado	41
Tabla 1.1 Clasificación de reómetros de acuerdo al tipo de deformación	7
Tabla 4.1 Viscosidad real y experimental del PEG, concentraciones 10%, 15%, 20%, 25% y 40%	40

Introducción

Debido a la importancia para la industria de conocer las propiedades reológicas de los materiales, específicamente fluidos, la reología desempeña un papel decisivo en los procesos. El reómetro es un instrumento muy útil para llevar a cabo la caracterización de dichas propiedades en los materiales, permitiendo diseñar, modificar y/o controlar un proceso o producto, adecuando la maquinaria a las propiedades del producto. No sólo es de importancia en la industria; en la docencia también es necesario equipar laboratorios universitarios dedicados al estudio de los fluidos.

En el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) se tiene la misión de realizar investigación científica aplicada y desarrollo tecnológico para innovar procesos y productos que ayuden a resolver problemas prioritarios del interés nacional. Dicha misión es adoptada por cualquier ingeniero, ya que en su esencia misma debe transformar los fenómenos de la naturaleza en aplicaciones que cubran ciertas necesidades de la sociedad. Así, en colaboración con el Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería, se plantea la necesidad de desarrollar un instrumento que apoye a los alumnos en la caracterización de propiedades reológicas de manera experimental.

En resumen, se puede decir que la reología se encarga de estudiar la viscosidad, la plasticidad y la elasticidad de los fluidos. A lo largo de la última década, la reología ha experimentado cambios muy notables gracias a los desarrollos teóricos y a la aparición en el mercado de equipos de medida (reómetros) que son capaces de dar una información que va mucho más lejos que

el simple coeficiente de viscosidad. La palabra reómetro puede ser muy genérica, refiriéndose a una deformación de geometría particular tal como un reómetro de corte o un reómetro extensional.

El diseño mecánico del reómetro que se presenta en este trabajo es la integración de varios subsistemas; cilindros concéntricos, cojinete neumático, acoplamiento del motor con el rotor, brazo de palanca y celda de carga, así como el circuito de control electrónico. Siendo cada uno de estos un tema de estudio en particular, pero no es el propósito del trabajo que se presenta.

El diseño del reómetro propuesto se ubica en particular en la división de los reómetros de corte, siendo el modelo de cilindros concéntricos uno de varios que tienen como acción de flujo el arrastre del fluido. El sistema de operación es del tipo Searle y la geometría de cilindros está bajo estándares de la norma DIN 53019 y su homóloga ISO 3219.

Conforme al sistema Searle, el cilindro interior es la superficie móvil, cuyo movimiento de arrastre angular es generado por un motor. Dicho movimiento se transmite al fluido para ocasionar un flujo y que éste mismo transmita el arrastre al cilindro exterior para generar un par de torsión que permita calcular la viscosidad del fluido en uso.

En el primer capítulo de la tesis que se presenta, se dan a conocer al lector los aspectos generales que están relacionados con la reología, la reometría y los diferentes reómetros comerciales.

En el siguiente capítulo, se describe el principio de operación de un reómetro rotacional de cilindros concéntricos, para establecer las bases teóricas bajo las cuales se propone el desarrollo del reómetro y sus variables a controlar.

En el tercer capítulo se describe el diseño de las piezas y ensamble de las mismas. Además, se presenta la calibración del reómetro y descripción de las pruebas.

Por último, en el cuarto capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos de las pruebas con fluidos newtonianos.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Reología

La reología se define como el estudio de la deformación y el comportamiento de flujo de la materia. Esta definición fue expresada por el profesor Bingham Lafayette. En un inicio incluía cualquier fenómeno relacionado con un comportamiento de flujo: aeronáutica, hidráulica, mecánica de fluidos e incluso la mecánica de sólidos. Sin embargo, en la práctica la reología tiene sus límites constituidos por la ley de sólido elástico de Hooke y la ley de viscosidad de Newton. Ambos modelos son isotrópicos y siguen con precisión las leyes que los describen. Existen modelos intermedios; el modelo de Bingham, que representa a un plástico ideal, y los de Maxwell y Kelvin-Voigt que representan el líquido y sólido viscoelásticos ideales, respectivamente.

El interés por la reología fue aumentando con la aparición de las fibras sintéticas, plásticos, detergentes, aceites multigrado, pinturas y adhesivos entre otros. La reología es de gran importancia para el desarrollo de múltiples industrias, por ejemplo, la industria farmacéutica y alimenticia, así que es de gran relevancia el estudio minucioso del comportamiento de las propiedades materiales.

Las razones por las cuales el estudio de la reología es de gran importancia son:

- a) Contribuye al conocimiento del comportamiento de flujo de los materiales.
 - Caracterización de elastómeros y de polímeros (por ejemplo, PVC).
 - Caracterización de metales (en situaciones de elevada temperatura) y de cristales líquidos.

- b) En la industria se determinan propiedades reológicas para la elaboración de productos y su control de proceso.
 - Estabilidad de emulsiones y suspensiones.
 - Caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos.
 - Producción de medicamentos. Se estudia su estabilidad química, su tiempo de caducidad y su facilidad de extrusión, entre otras.
 - Estudio de la textura y consistencia de productos alimenticios.
 - Control de calidad de los alimentos.

- c) Auxilia en el diseño de máquinas, ya que es preciso adecuarlas a las características de los productos a procesar.
 - Control de sustancias que son transportadas a lo largo de un recipiente cilíndrico.
 - Producción de pinturas.
 - Producción de pegamentos.

1.2 Viscosidad

Newton expresó en su tratado “Principia Mathematica”, entre otros conceptos, la idea básica para un fluido viscoso. La resistencia del fluido representaba un esfuerzo local, el cual era el cambio de velocidad con respecto a la posición en el fluido. La proporcionalidad entre el esfuerzo local y la velocidad de deformación es la viscosidad o la carencia de deslizamiento, cuya expresión bidimensional es:

$$\tau_{xy} = \eta \frac{dV_x}{dy} \quad (1.1)$$

donde τ_{xy} es el esfuerzo local, η es la viscosidad y $\frac{dV_x}{dy}$ es la velocidad de cambio o deformación.

Aunque el razonamiento de Newton era correcto, fue hasta 1845 cuando Stokes pudo finalmente definir la expresión matemática de la viscosidad. En 1856 se obtuvo una relación experimental de la viscosidad utilizando un reómetro de flujo capilar de Poiseuille. Por su parte, Couette probó dicha relación con mayor detalle usando un instrumento de cilindros concéntricos, encontrando los mismos resultados de acuerdo a las viscosidades determinadas en los experimentos de flujo capilar.

Así, la viscosidad (η) es un término definido como el coeficiente entre el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$);

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1.2)$$

Existen tres tipos de viscosidad; la *viscosidad dinámica o absoluta* (η) que se refiere a la pendiente en cada punto de la curva descrita por la ecuación (1.2) de un fluido en general (preferentemente no newtoniano), la *viscosidad aparente* (μ) también es descrita por la ecuación (1.2), donde la μ hace referencia a un fluido newtonianos. Y la *viscosidad cinemática* (ν) que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido en uso.

La viscosidad absoluta se puede expresar en unidades de Poiseuille (PI), un Poiseuille equivale a 1 Pascal por segundo (Pa·s) ó 10 poises, siendo algunas de las unidades con las que se puede registrar la propiedad de la viscosidad. En el caso de la viscosidad cinemática las unidades más utilizadas son los stokes (st) y centímetro cuadrado sobre segundo (cm^2/s), 1 stoke = $1 \text{ cm}^2/\text{s}$.

1.3 Tipos de fluidos

El fluido se puede definir como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de un esfuerzo cortante. Las características reológicas de los fluidos determinan las propiedades funcionales de las sustancias, dichas características se define con base en la relación que existe entre el sistema de fuerzas externas (esfuerzos cortantes) y su respuesta, deformación o flujo.

Un fluido newtoniano está descrito por la ecuación 1.2, donde el coeficiente de viscosidad (η) es una constante independiente al esfuerzo de corte que se aplica; el nombre es en honor a Sir Isaac Newton quien fue el primero en establecer una descripción matemática del flujo viscoso. La glicerina, el aceite de olivo y el agua son ejemplos muy comunes que obedecen la Ley de Newton. Un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque si

puede ser dependiente tanto de la temperatura como de la presión de las condiciones donde se encuentre. La representación gráfica de τ vs. $\dot{\gamma}$ es una línea recta que pasa por el origen, la pendiente está dada por η y, al ser una constante, basta con una determinación para caracterizar completamente el comportamiento del fluido, ver figura 1.1.

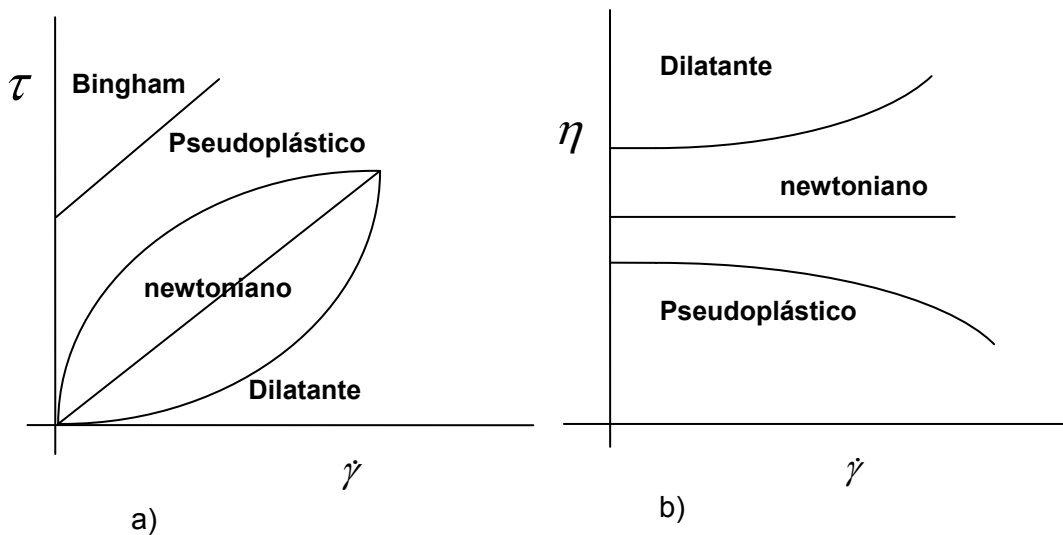


Figura 1.1 Gráficas de fluido newtoniano y no newtoniano. a) Curva de fluidez y b) Curva de viscosidad

Existen numerosos fluidos que no cumplen esta relación tan simple, como se observa en la figura 1.1; suele tratarse de suspensiones de sólidos o emulsiones de líquidos en el seno de un líquido. Dichos fluidos son llamados no newtonianos, en cuyos casos la viscosidad depende del esfuerzo de corte al que es sometido el fluido. Hay distintos tipos de fluidos no newtonianos:

- Dilatantes. La viscosidad es directamente proporcional al esfuerzo de corte. (Disoluciones de almidón muy concentradas, arena húmeda, masa de harina de maíz)
- Pseudoplásticos. La viscosidad es inversamente proporcional al esfuerzo de corte. (Mostaza, algunas pinturas).
- Bingham o plástico. Para ocasionar el movimiento del fluido hay que sobrepasar un valor mínimo de esfuerzo de corte para poner en movimiento al fluido. (Chocolate, mantequilla, mayonesa, pasta de dientes, catsup).
- Tixotrópicos. La viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo de corte. (Algunas pinturas, yogurt, tintas de impresión)
- Reopéxicos. Su viscosidad aumenta al incrementar el tiempo de aplicación del esfuerzo de corte. (Yeso)
- Viscoelásticos. Presentan un comportamiento dual, elástico y plástico. (Nata, helado).

1.4 Reometría

Con el fin de caracterizar el comportamiento del fluido, la reometría proporciona un conjunto de técnicas para efectuar las mediciones reológicas, establece relaciones entre entidades medibles (momento de torsión, fuerza, desplazamiento, velocidad angular) y una función material.

Para llevar acabo la caracterización del flujo se utiliza un instrumento llamado reómetro. En ocasiones la palabra viscosímetro es usada para definir a un reómetro. Estrictamente hablando, un viscosímetro es un caso especial de un

reómetro ya que sólo puede determinar la viscosidad en función de la velocidad de corte. El reómetro mide la deformación y el esfuerzo en un material para determinar las ecuaciones teóricas que permitan relacionar las variables dinámicas y así determinar las propiedades materiales.

Esto se refiere a un instrumento específico para llevar a cabo dicha deformación de acuerdo a la geometría de operación, la cual es útil para categorizar los reómetros dependiendo de la función material que puedan determinar.

Tabla 1.1 Clasificación de reómetros de acuerdo al tipo de deformación.

Homogéneos	Extensionales	Rodamiento de esfera Mordazas rotacionales Extensión simple, compresión lubricada
	De corte	Platos deslizables Cilindros concéntricos Cono y plato Discos rotatorios
No homogéneos	De corte	Superficie de corte Discos paralelos Capilar De corte largo Anular

1.5 Clasificación de reómetros

Los reómetros se pueden clasificar de acuerdo al tipo de deformación en homogéneos y no homogéneos, ver tabla 1.1. En la deformación homogénea el esfuerzo y la deformación son independientes de la posición a lo largo de la muestra, para el caso de la deformación no homogénea el esfuerzo no es uniforme; pero se representa por alguna función simple de posición. Otra clasificación se realiza por la cinemática del instrumento; reómetros de corte que utilizan el arrastre para ocasionar la deformación (figura 1.2) y los de presión que generan la deformación por medio de una diferencia de presiones (figura 1.3). Los instrumentos y problemas experimentales usados en cada uno de los tipos existentes son completamente diferentes de los otros.

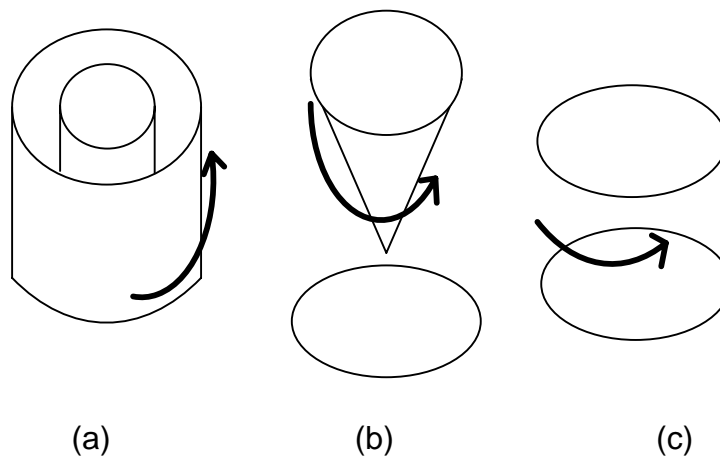


Figura 1.2 Tipos de reómetros de corte.
(a) Cilindros concéntricos; (b) Cono y plato y (c) Discos paralelos

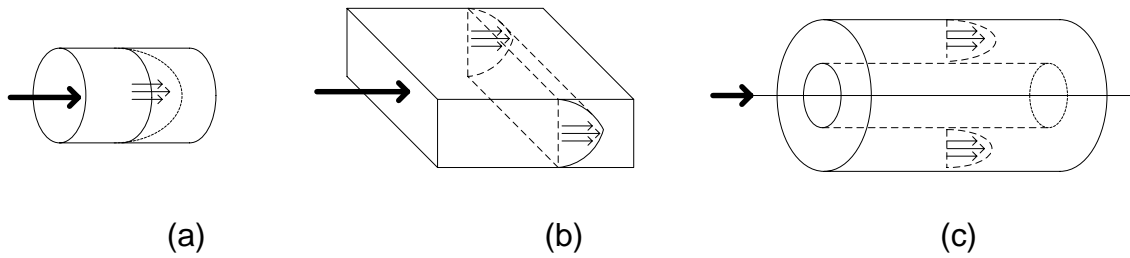


Figura 1.3 Tipos de reómetros de presión.
 (a) Capilar; (b) Flujo de contracción o entrada y (c) Flujo axial anular

1.6 Reómetros rotacionales

El sistema de reómetros rotacionales (cilindros coaxiales) pertenece a la subdivisión de los reómetros de corte y parte del modelo de placas paralelas de Newton, modificando la geometría de las placas hasta formar un cilindro exterior y otro interior como se observa en la figura 1.4.

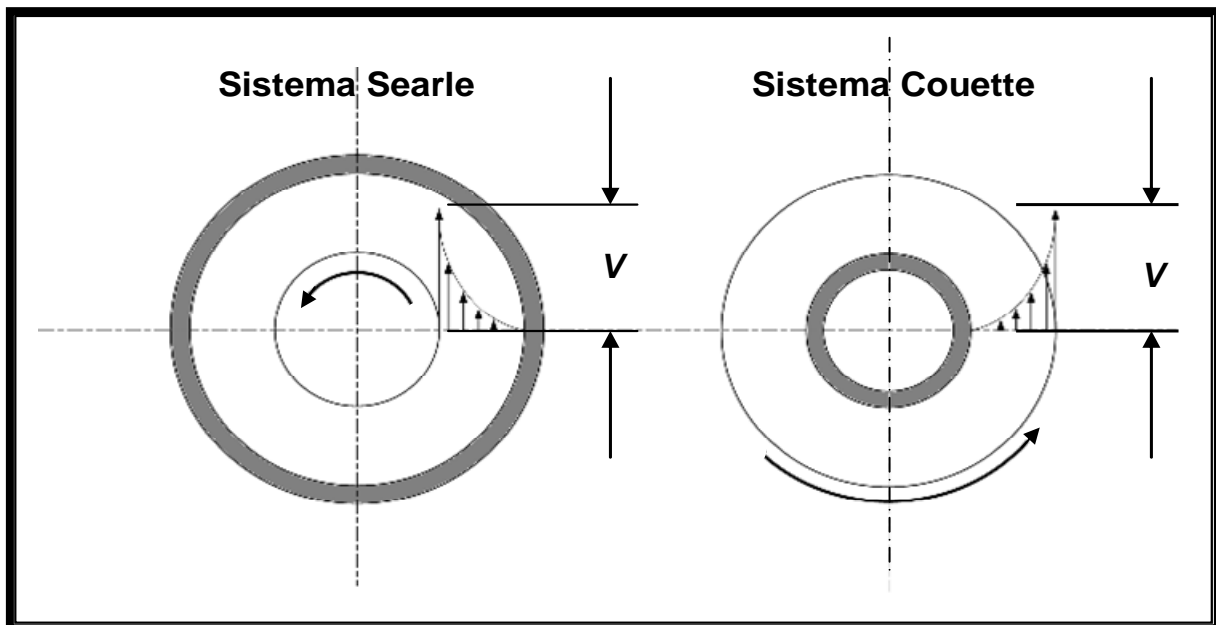


Figura 1.4 Perfil de velocidad de flujo y de viscosidad en sistemas de medición Searle y Couette.

Este arreglo de cilindros permite aplicar un esfuerzo de corte al fluido contenido en la región anular entre cilindros. Existen dos sistemas de operación para esta geometría: de esfuerzo de corte controlado y de gradiente de velocidad de arrastre controlada. Siendo este último el principio de operación de la mayoría de reómetros de cilindros coaxiales.

Los reómetros de gradiente de velocidad de arrastre controlada tienen dos versiones:

- *Sistema Searle*. El cilindro interior gira con una velocidad angular constante o variable, mientras el cilindro exterior permanece en reposo.
- *Sistema Couette*. El cilindro exterior gira con una velocidad angular constante o variable y el cilindro interior se encuentra en reposo.

En ambos sistemas el cilindro en rotación provoca el flujo del fluido que, se encuentra en la región anular entre los cilindros, ocasiona un momento de giro en el otro cilindro. Este momento de giro permite determinar la viscosidad del fluido bajo estudio.

1.7 Reómetros comerciales

- *Reómetro R/S Plus, Brookfield™*.

Disponible en tres configuraciones: *Model R/S Coaxial cylinder*, *Model R/S-CPS* y el *Model RVS-SST* para una gran variedad de tipos de muestras. El motor desarrollado para este reómetro tiene gran precisión dinámica, maneja un sistema sin engranajes o fuerzas mecánicas transductoras, lo que permite controlar el par

de torsión sin deflexión. Además cuenta con un codificador incremental angular óptico de 400,000 líneas que mide a detalle la posición del husillo durante la rotación. La combinación en el manejo del motor con el codificador incremental angular óptico permite al R/S ser operado por medio de esfuerzo de corte controlado o deformación controlada. El rango del par de torsión (0.05 a 50 mN·m) generado por el motor permite tener mayores aplicaciones, usualmente limitadas en los reómetros de investigación.

El control de la deformación de corte proporciona información para el análisis del desarrollo del flujo en función del cambio de viscosidad con la velocidad de giro y el tiempo. Si el esfuerzo es controlado, el operador puede hacer registros directos del esfuerzo producido y determinar el arrastre y las propiedades visco elásticas.

- *Viscosímetro HAAKE 550™.*

Viscosímetro rotacional especialmente diseñado para aplicaciones de control de calidad. Mide con precisión la rapidez de deformación y la viscosidad en el desarrollo del flujo para pruebas de materiales líquidos y semisólidos. No importa si es una muestra muy fina como un aceite, una pintura o una mezcla de cerámica o es una muestra tan pastosa como la crema, ungüento o plásticos PVC.

El principio de operación es del tipo Searle. La velocidad angular es preestablecida y la resistencia del flujo de la muestra es registrada, en otras palabras el par de torsión requerido para mantener la velocidad establecida es proporcional a la viscosidad. El par de torsión requerido, la velocidad angular establecida y los factores de geometría son aplicados al sensor para proporcionar al final la estimación de la viscosidad, esfuerzo de corte y velocidad de deformación. Permite operar un total de 60 diferentes velocidades angulares, 50

de las cuales son preestablecidas y las 10 restantes son programables (0.5 rpm - 800 rpm). El par de torsión es registrado a través de un sensor sin contacto con una señal perfectamente lineal.

El diseño modular del Haake 550™ permite el uso de cualquier geometría conocida, por tanto todas las aplicaciones pueden ser cubiertas, por ejemplo:

- Cilindros coaxiales bajo la norma DIN 53018 e ISO 3219.
- Cilindros de inmersión bajo la norma DIN 53019 e ISO 3219.
- Cono-Plato y Platos paralelos bajo la norma ISO 3219.

El uso de estos sensores garantiza que los resultados puedan ser comparados con los de cualquier equipo de otros laboratorios.

- Reómetro Haake RheoStress 1™.

Reómetro universal para laboratorio con las características de un instrumento de grado de investigación con capacidades excelentes alcanzadas con la ayuda del uso de un cojinete de aire de 4a generación y la tecnología de un procesador de señal digital (DSP). Los lazos del adaptador del control digital permiten todo tipo de mediciones en sistemas de control de esfuerzo, control de deformación y control de velocidad de deformación.

- Reómetro Haake RotoVisco 1™.

Clásico reómetro rotacional, que combina un motor de velocidad controlada con un sistema de medición del par de torsión sin fricción para hacer un instrumento preciso y confiable. Es compatible con todos los rangos de sistemas

de sensores, hechos de titanio para las partes de rotación y de acero para las partes estacionarias. Es capaz de alcanzar altas temperaturas de aplicación, donde las geometrías son equipadas con un eje cerámico para prevenir pérdidas de calor.

- Reómetros AR, TA Instruments™.

La serie AR ofrece un funcionamiento incomparable y de fácil uso gracias a su diseño. Cada generación de la serie AR maneja una innovación continua para un mejor funcionamiento que permita proveer pruebas eficientes. Con un funcionamiento de bajo par de torsión sin precedentes, esfuerzo sin par y control directo de deformación, *software* intuitivo y un diseño versátil.

- Motor de baja fricción que aplica el par de torsión y controla la velocidad y frecuencia de oscilación. Este tipo de motores pueden aplicar una aceleración uniforme que es ideal para el arrastre y recuperación de las mediciones. La inercia es considerablemente baja, reduciendo el error en los resultados de la prueba mediciones de oscilación y transitorios.
- Cojinete de empuje que proporciona estabilidad, soporte axial de baja fricción en el eje y las geometrías de medición. La generación de un bajo par de torsión final depende de la fricción residual del cojinete, los cuales son residuales en los resultados del par de torsión.

- Reómetros ARES, TA Instruments™.

La serie ARES ofrece el mejor funcionamiento en mediciones reológicas debido a un motor exclusivo separado con diseño patentado del transductor de fácil uso. Está disponible para que pueda ofrecer viscosidad independiente, libre de fricción en la oscilación de las mediciones. Los reómetros de corte cuentan con

una plataforma para accesorios de viscosidad extensional, análisis de multi-ondas y control de tensión que permiten el funcionamiento en corte y tensión. Realizan pruebas en fluidos, suspensiones y sólidos a corte y tensión, con análisis reológico simultáneo a un análisis óptico o dieléctrico.

- *Bohlin Gemini, Malvern™*.

Instrumentos compactos de un nivel de investigación con capacidad en “fluidos y sólidos”. De operación óptima en ambos sistemas, esfuerzo controlado y deformación controlada. Un Bohlin Gemini es la pieza central de un sistema de reómetro modular, incluyendo una variedad de geometrías de medición y accesorios. Controles de temperatura EasySwap™ que incluyen dispositivos Peltier, un horno de gas forzado con nitrógeno líquido como opción de enfriamiento, calentamiento eléctrico y una constante circulación de fluidos que regulan la temperatura.

Su tecnología le permite un buen control del par de torsión y velocidad a lo largo de estado permanente, dinámico y transitorio, permite el perfecto funcionamiento del sistema tanto en pruebas de control de deformación como en pruebas de esfuerzo controlado. También la oscilación es controlada directamente por la amplitud del esfuerzo sin ajuste iterativo del ciclo del esfuerzo, el sensor controla el comportamiento del esfuerzo en la prueba y reduce el tiempo de experimentación. La prueba de esfuerzo de relajación con incremento de tiempo, alrededor de milisegundos, se mantiene con una deformación constante durante el decremento del esfuerzo mientras el controlador ajusta el par de torsión. En experimentos de corte estable el controlador permite cambios instantáneos en la velocidad, incluyendo flujos reversibles rápidos, mientras se ajusta el par de torsión.

Un motor de inducción de baja inercia permite el ajuste de la posición o velocidad más rápido que los motores convencionales, con imanes permanentes y una respuesta dinámica adecuada para el funcionamiento transitorio y dinámico. En combinación con la alta sensibilidad del cojinete neumático se crea un par de torsión continuo. La resolución del control de par de torsión permite al Gemini mejorar el par de torsión bajo medida exacta para un mínimo de 3 nNm, asegurando datos correctos de baja viscosidad y la capacidad de investigar incluso en las estructuras viscoelásticas.

Un sensor de fuerzas normales opera de manera independiente al giro del cojinete de aire para asegurar que las fuerzas normales de salida son simétricas axialmente en los 360°. En la oscilación, el sensor puede ser usado en pruebas de tensión o compresión con fuerzas predefinidas.

Existe una variedad comercial de reómetros en el mercado a causa de la demanda de instrumentación para la investigación y caracterización de los materiales bajo un comportamiento de flujo, tanto en procesos industriales como en laboratorios de investigación. Existen diferentes versiones de un mismo instrumento que satisfacen las funciones básicas de caracterización, pero en algunos casos se ofrece un análisis con mayor detalle como lo es el microscópico. Por todo lo anterior, es posible elegir un instrumento que sea el más adecuado a las necesidades de estudio y económicas del cliente.

Capítulo 2

Principio de operación

2.1 Descripción del principio de operación de un reómetro rotacional de cilindros concéntricos

El principio de operación se basa en el método de *velocidad de arrastre controlada*, bajo el sistema Searle. Este sistema permite un arreglo simple de recuperación de datos del cilindro exterior, como lo es el brazo de palanca acoplado al eje axial del cojinete neumático y la celda de carga como punto de aplicación de la fuerza equivalente del par de torsión.

Básicamente la operación del reómetro consiste en sumergir un cilindro de bajo momento inercial (cilindro interior) en un fluido contenido por la copa (cilindro exterior), el rotor se encuentra en una posición concéntrica respecto a la copa para generar la región anular simétrica entre ambos cilindros. Un motor le provee la velocidad angular (Ω_{int}) necesaria al rotor para iniciar el arrastre del fluido e iniciar el flujo del mismo. Cuando el cilindro interior rota con una velocidad angular constante, el par de torsión (T) que genera el motor se transmite al cilindro exterior a través del flujo del fluido.

La copa es acoplada a un cojinete neumático para reducir los efectos de las fuerzas de fricción en el movimiento de rotación. Un eje axial ensamblado a la copa y que atraviesa el cojinete tiene acoplada una flecha en su parte inferior, la

flecha se encuentra en un ángulo de 90° con respecto al eje axial del cojinete y los cilindros.

La transmisión del movimiento entre los cilindros permite que el brazo de palanca ejerza una fuerza sobre un sensor, la fuerza es equivalente al par de torsión de oposición al arrastre por parte del fluido. Registrando la distancia entre el eje axial y el punto de aplicación de la fuerza y cuantificando la fuerza ejercida, se obtiene el valor del par de torsión equivalente al flujo del fluido. Una vez determinado el par de torsión se puede estimar la viscosidad del fluido (μ) con base en las ecuaciones de continuidad, ver ecuaciones (B.4-2) de la sección del apéndice, y de transferencia de *momentum* en términos de gradientes de velocidad para fluidos newtonianos con densidad (ρ) y viscosidad (μ) constantes (ecuaciones de Navier-Stokes), ver ecuaciones (B.6-4), (B.6-5) y (B.6-6) en la sección del apéndice.

Para analizar la conservación de cantidad de movimiento, se considera que las mediciones se efectúan una vez que el fluido se encuentra en estado permanente y se asume que tiene un régimen laminar, ya que ni la velocidad angular ni la viscosidad que alcanza el sistema generan un número igual o mayor al Reynolds crítico. Además, se hacen las siguientes consideraciones:

- Los cilindros son más largos comparados con el radio de los mismos.
- El cilindro interior rota a una velocidad angular constante.
- El vector de velocidad es función de la posición radial.
- El par de torsión necesario para mantener constante la velocidad angular del cilindro es función de la geometría de los cilindros y de la viscosidad del fluido.

- Las ecuaciones de Navier-Stokes se expresan en coordenadas cilíndricas.
- Fluido newtoniano, isotérmico e incompresible.

Al suponer un flujo en régimen permanente la diferencial con respecto al tiempo es igual a cero, $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, ya que las condiciones de flujo permanecen constantes en cualquier instante. Para fines de este análisis se hace un cambio de variable, $u_r = V_r$, $u_\theta = V_\theta$ y $u_z = V_z$, sin que causen alguna alteración en el resultado.

en la componente r :

$$\begin{aligned} \rho \left(\cancel{\frac{\partial V_r}{\partial t}} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] + \rho g_r \end{aligned}$$

en la componente θ :

$$\begin{aligned} \rho \left(\cancel{\frac{\partial V_\theta}{\partial t}} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) \\ = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta \end{aligned}$$

en la componente z:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \end{aligned}$$

Asumiendo un flujo laminar entre los cilindros, las distribuciones de velocidad y presión son independientes de la posición angular. Con esto, la diferencial con respecto a θ es igual a cero, $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$, y la velocidad radial es nula, $u_r = 0$.

en la componente r:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] + \rho g_r \end{aligned}$$

en la componente θ :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) \\ = - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta \end{aligned}$$

en la componente z :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \end{aligned}$$

Los cilindros no presentan movimiento en la dirección del eje z , por lo que no hay flujo en esta dirección y la velocidad sobre el mismo eje es nula, $u_z = 0$.

Además, u_θ sólo depende de r , siendo así $\frac{\partial u_\theta}{\partial z} = 0$. Por último, la gravedad sólo tiene componente en el eje z , entonces, $g_\theta = 0$ y $g_r = 0$.

en la componente r :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] + \rho g_r \end{aligned}$$

en la componente θ :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) \\ = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta \end{aligned}$$

en la componente z :

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z$$

Con las consideraciones anteriores se pueden simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas a las formas siguientes:

- La componente r :

$$-\rho \frac{u_\theta}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) refiere al gradiente de presión radial debido a la aceleración centrífuga.

- La componente θ :

$$0 = \mu \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) \right] \quad (2.2)$$

- La componente z :

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) describe al gradiente de presión hidrostática.

Para determinar la viscosidad es de interés la ecuación de la componente θ . Al ser u_θ función sólo de r , las derivadas parciales se pueden considerar como derivadas ordinarias. Además, recordando que la viscosidad es constante por ser un fluido newtoniano incompresible, la ecuación (2.2) se reordena de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r u_\theta \right] = 0 \quad (2.4)$$

Realizando una doble integración de la ecuación (2.4) se obtiene:

$$u_\theta = \frac{C_1}{2} r + \frac{C_2}{r} \quad (2.5)$$

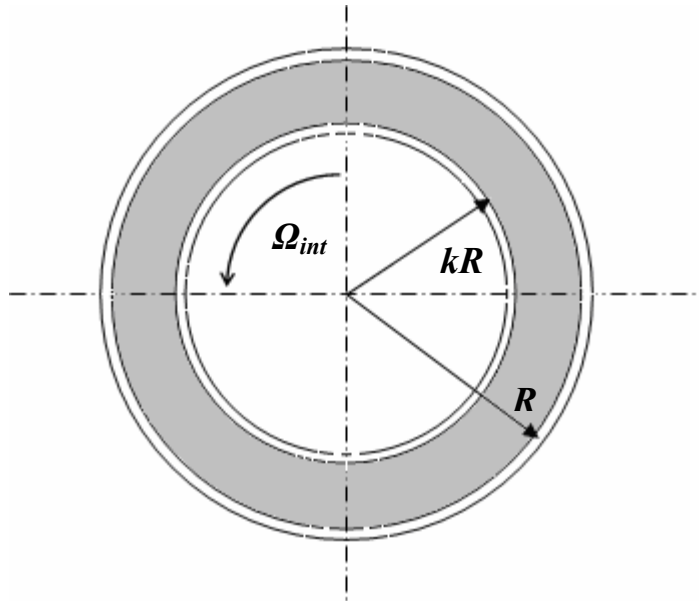


Figura 2.1 Configuración de la geometría de cilindros concéntricos

Para evaluar las constantes C_1 y C_2 se plantean las condiciones de frontera siguientes:

- a) Si $r = R$, $u_\theta = 0$, se considera que la superficie del cilindro exterior es fija.

$$0 = \frac{RC_1}{2} + \frac{C_2}{R} \quad (2.6)$$

- b) Si $r = kR$, $u_\theta = kR\Omega_{int}$, la superficie del cilindro interior esta en rotación.

$$kR\Omega_{int} = \frac{kRC_1}{2} + \frac{C_2}{kR} \quad (2.7)$$

donde k es una constante de proporcionalidad definida por la relación entre los radios de cilindros, $r = kR$. R es el radio interior de la copa (cilindro exterior), r es el radio del rotor (cilindro interior) y Ω_{int} es la velocidad de arrastre establecida, ver figura 2.1.

Resolviendo el sistema de ecuaciones (2.6) y (2.7) se obtiene la ecuación general para el movimiento en la componente θ :

$$u_\theta = \frac{\Omega_{int} kR}{\left(\frac{1}{k} - k\right)} \left(\frac{R}{r} - \frac{r}{R}\right) \quad (2.8)$$

Sólo una fuerza se resiste a la rotación del cilindro interior (F), esta es una fuerza de corte que actúa en la dirección θ , en una superficie normal a la dirección r . La fuerza de corte corresponde a la componente de efectos viscosos, la cual

esta basada en la ley general de viscosidad de Newton, ecuación (B.1-11) de la sección del apéndice:

$$\tau_{r\theta} = -\mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] \quad (2.9)$$

donde $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$, además al sustituir la ecuación (2.8) en (2.9) se obtiene:

$$\tau_{r\theta} = \frac{2\mu k \Omega_{\text{int}}}{\left(\frac{1}{k} - 1\right)} \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad (2.10)$$

El par de torsión (T) es producto del movimiento del flujo, la superficie del cilindro y el brazo de palanca:

$$T = \tau_{r\theta} A r \quad (2.11)$$

donde A es el área de la pared del cilindro en contacto con el fluido.

Para determinar el par de torsión en ambos cilindros se evalúa la ecuación (2.11) de la siguiente manera:

$$T_{\text{interior}} = \tau_{r\theta} \Big|_{r=kR} 2\pi k R L_2 \cdot kR \quad (2.12)$$

$$T_{\text{exterior}} = \tau_{r\theta} \Big|_{r=R} 2\pi R L_1 \cdot R \quad (2.13)$$

donde L_1 es la altura de la superficie cilíndrica del cilindro interior y L_2 es la altura del cilindro exterior, ver figura 3.3 para mayores detalles.

Sustituyendo la ecuación (2.10), valuada en $r = R$, en la ecuación (2.13):

$$T_{\text{exterior}} = 4\mu\Omega_{\text{int}}\pi R^2 L \left(\frac{k^2}{1-k^2} \right) \quad (2.14)$$

El par de giro se puede medir en el cilindro exterior estimar de la forma:

$$T = F \cdot d \quad (2.15)$$

donde F es la fuerza equivalente al par de giro y d es la distancia de aplicación de la fuerza.

Sustituyendo la ecuación (2.15) en la ecuación (2.14) y despejando μ , se tiene:

$$\mu = \frac{F \cdot d}{4\Omega_{\text{int}}\pi R^2 L_1} \left(\frac{1-k^2}{k^2} \right) \quad (2.16)$$

La ecuación (2.16) permite determinar la viscosidad del fluido (μ) y con ella misma caracterizar el reómetro.

2.2 Efectos finales

En las suposiciones para el flujo entre cilindros concéntricos se ignoraron algunos efectos finales. Tres geometrías son usadas frecuentemente para minimizar estos efectos (figura 2.2): geometría de fondo cónico, geometría de fondo hueco y geometría de doble Couette.

La geometría característica del fondo cónico para el cilindro interior, permite que la velocidad de deformación en el fondo pueda ser eliminada satisfactoriamente en regiones anulares muy estrechas entre cilindros.

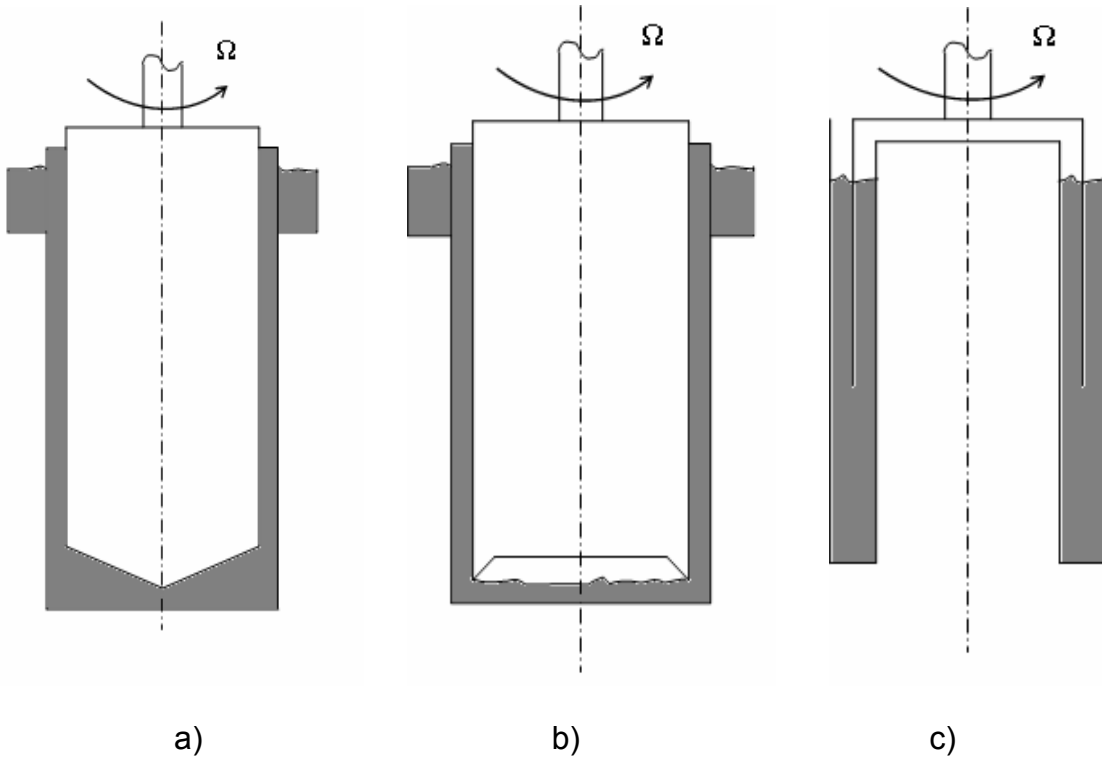


Figura 2.2 Tres diseños comunes para minimizar los efectos finales.

(a) Cilindro cónico; b) Fondo hueco; c) Doble Couette.

La ecuación de velocidad u_θ , ecuación (2.8), describe el flujo exacto para valores pequeños de velocidad angular del rotor. Sin embargo, cuando la velocidad angular del rotor alcanza un valor crítico,

$$\Omega_{crit} = 41.3 \left(\frac{\mu}{R^2 (1-k)^{\frac{3}{2}} \rho} \right) \quad \text{para } k \approx 1, \quad (2.17)$$

el fluido desarrolla un flujo secundario, el cual se superpone al flujo primario y se presenta de forma periódica en la dirección axial, ocasionando un sistema de vórtices toroidales, llamado vórtices de Taylor. El lugar geométrico de los centros de esos vórtices son círculos, cuyos centros se localizan en un eje común entre las paredes de los cilindros. Este flujo aún es en régimen laminar, pero inconsistente con los postulados hechos para el análisis del problema. Cuando la velocidad angular se incrementa, el lugar geométrico de los centros de los vórtices se desplaza de forma ondulatoria, siendo la velocidad angular del movimiento ondulatorio aproximadamente un tercio de la velocidad angular del rotor.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se presenta la descripción de los componentes principales del reómetro, cilindros, cojinete neumático, motor y celda de carga. También se presentan los fluidos de elección para realizar las pruebas de calibración, así como una delineación de dichas pruebas.

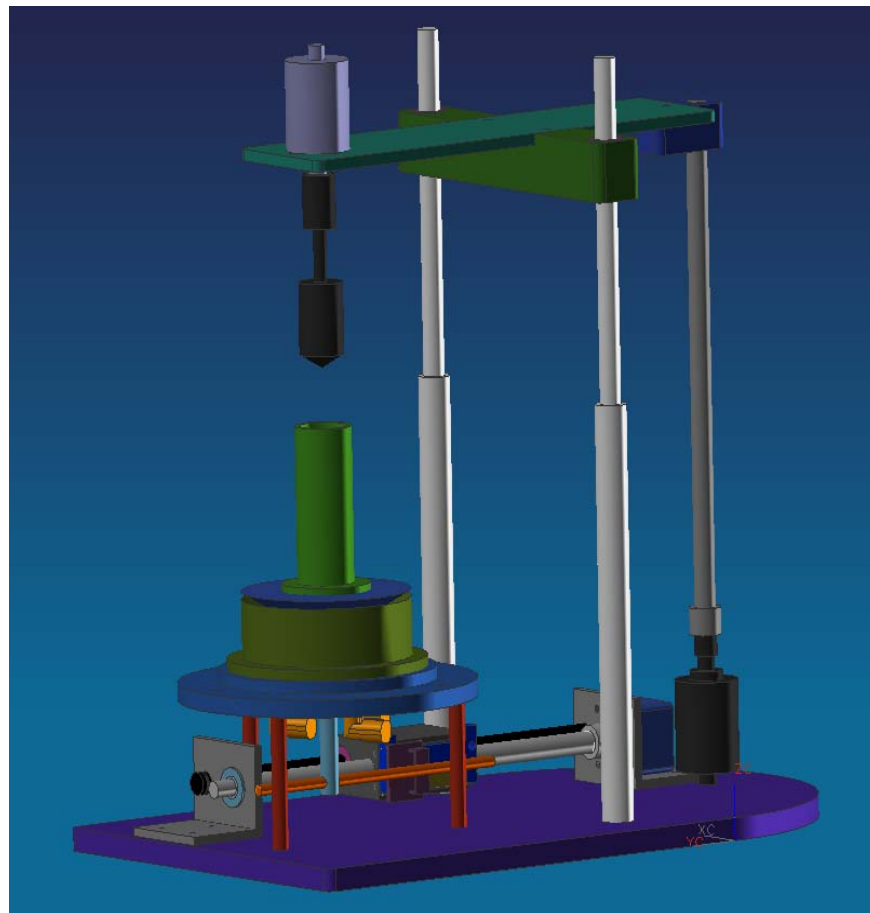


Figura 3.1 Ensamble virtual de todos los componentes del reómetro.

3.1 Descripción del reómetro rotacional

Las figuras 3.1 y 3.2 presentan un esquema y una imagen, respectivamente, del arreglo general del reómetro de cilindros concéntricos desarrollado en el presente trabajo. En dichas figuras pueden observarse los componentes básicos del reómetro, los cuales se describirán con detalle en el presente capítulo.

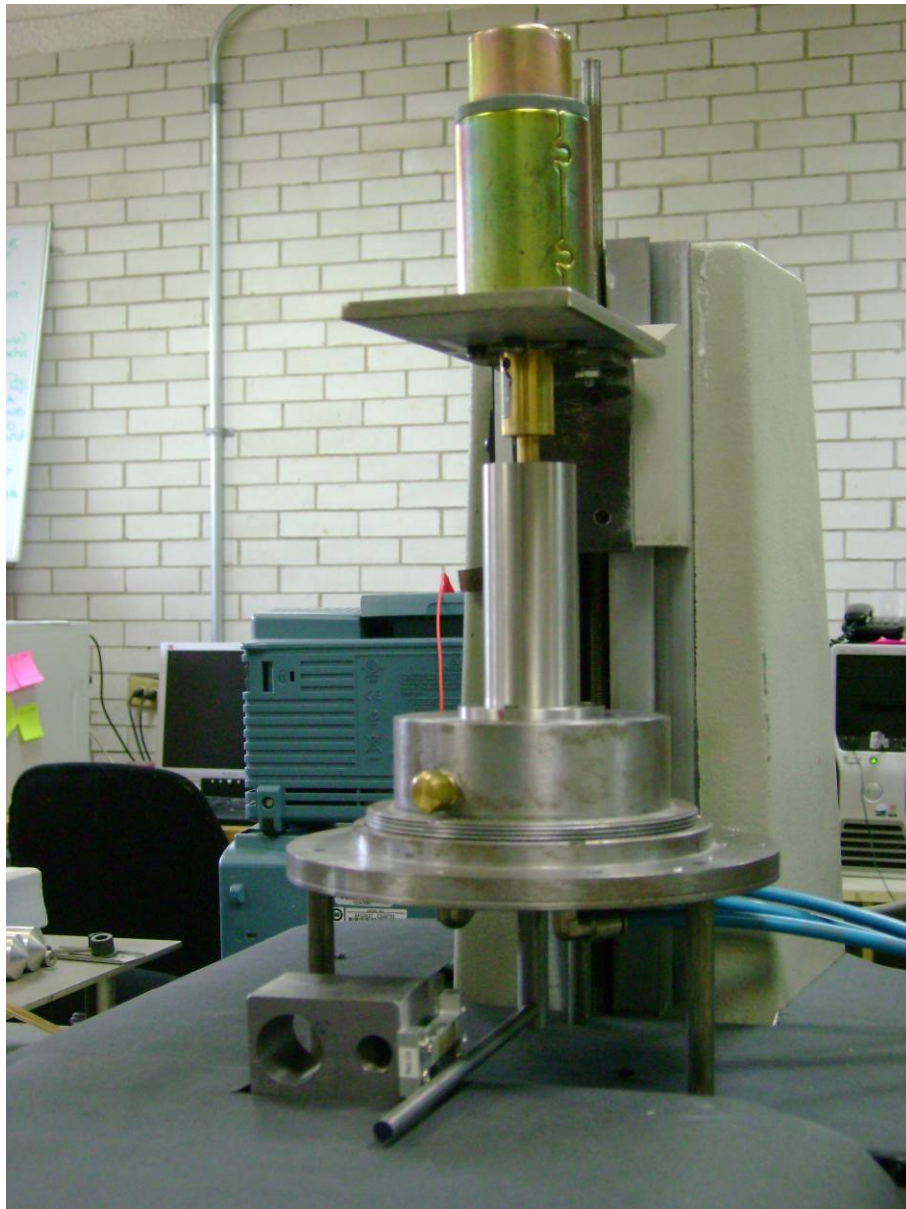


Figura 3.2 Prototipo del reómetro propuesto.

La geometría de los cilindros se seleccionó bajo las normas DIN 53019 y su homóloga ISO 3219, ver figura 3.3. La ranura anular entre los cilindros se restringe a una relación de sus mismos radios, que toma el valor de 1.0847. La distancia mínima desde la punta cónica del rotor y el fondo de la copa es por lo menos igual al radio del rotor. La relación de la longitud del rotor es tres veces la del radio del mismo. Un ángulo de 120° para la punta cónica del rotor. Con estas restricciones geométricas los errores de medición del gradiente de velocidad en la región anular se minimizan y se considera que permanecen constantes. Además, la unificación permite que los resultados de pruebas realizadas en diferentes reómetros puedan presentar mínimas diferencias en los datos adquiridos.

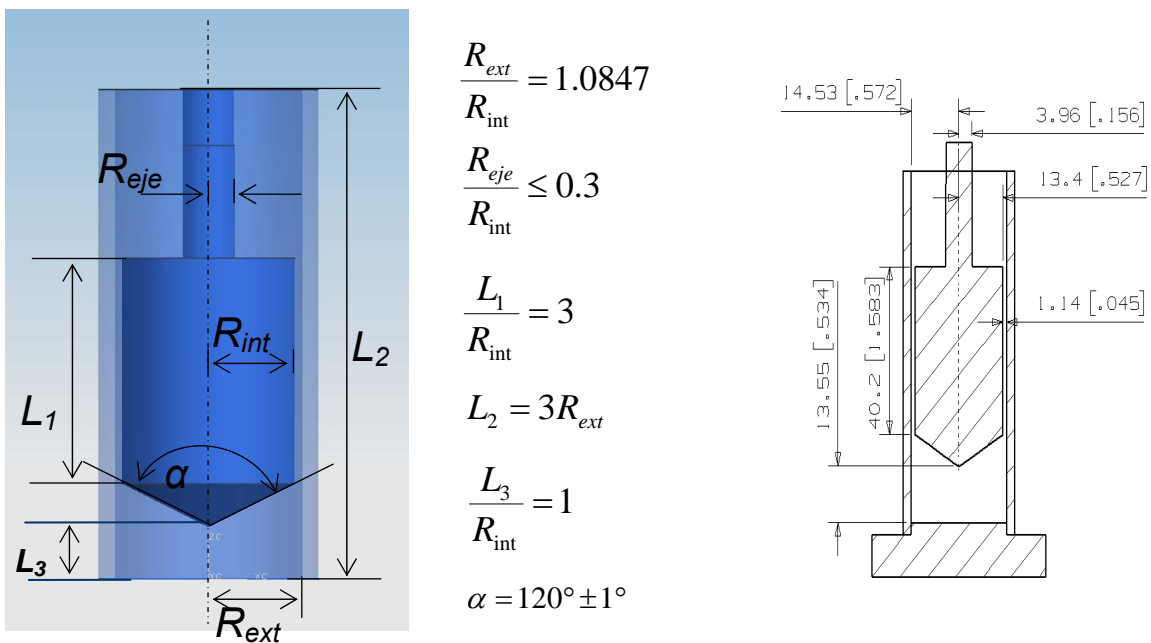
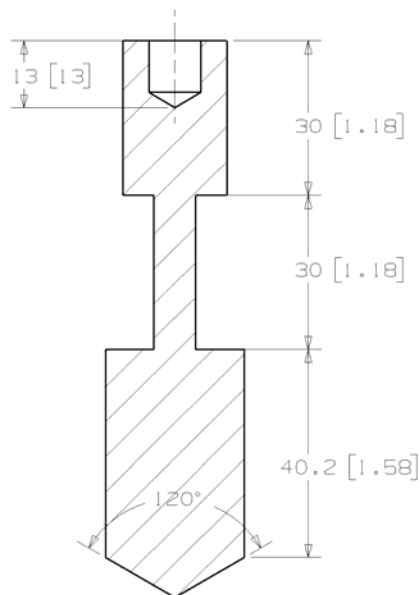


Figura 3.3 Geometría de cilindros bajo la norma DIN 53019/ ISO 3219.

Dimensiones en mm [plg].

3.1.1 Cilindro interior (rotor).

El rotor es un sólido de una sola pieza, ver figura 3.4, fabricado en acero inoxidable. El cilindro tiene una longitud total de 100.2 mm y un diámetro igual a 26.8 mm, la punta cónica cumple con un ángulo de 120° . La pared cilíndrica es de 40.2 de altura. El eje del rotor tiene una longitud de 30 mm y un diámetro de 8.04 mm, el eje esta roscado en su parte superior para permitir el acoplamiento con el motor.



(a)

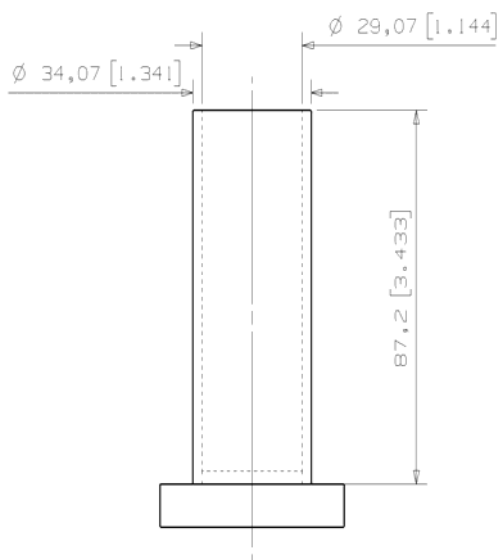


(b)

Figura 3.4 Cilindro interior (rotor): (a) Representación gráfica; (b) Rotor fabricado en latón.
Dimensiones en mm [plg].

3.1.2 Cilindro exterior (copa)

La copa es fabricada en acero inoxidable y en dos piezas para garantizar una superficie plana en el fondo de la misma, ver figura 3.5. El ajuste entre piezas es el necesario para evitar deslizamientos y fugas de fluidos en su ensamble. Tiene un diámetro interior de 29.07 mm y un espesor de pared de 2.5 mm. La altura de la copa es de 87.2 mm y la base es de un diámetro exterior igual a 51.43 mm.



(a)



(b)

Figura 3.5 Cilindro exterior (copa): (a) Representación gráfica; (b) Copa fabricada en acero inoxidable. Dimensiones en mm [plg].

3.1.3 Cojinete neumático

El cojinete neumático, ver figura 3.8, consta de dos partes: una estática y otra dinámica. La parte estática (figura 3.6), tiene una geometría de cono truncado con un ángulo de 30° , respecto a la horizontal. Una altura de 16.27 mm, diámetro menor de 45.23 mm y diámetro mayor de 101 mm. En posición concéntrica a la superficie de diámetro menor se encuentra agujero roscado de diámetro igual a 9.50 mm ($3/8''$) 24 UNF. En la superficie de diámetro mayor, de manera concéntrica, se tiene una caja cilíndrica para la copa de un diámetro de 51.43 mm y una profundidad de 16 mm, en la base de la caja se encuentran tres agujeros equidistantes en un radio de 19 mm.

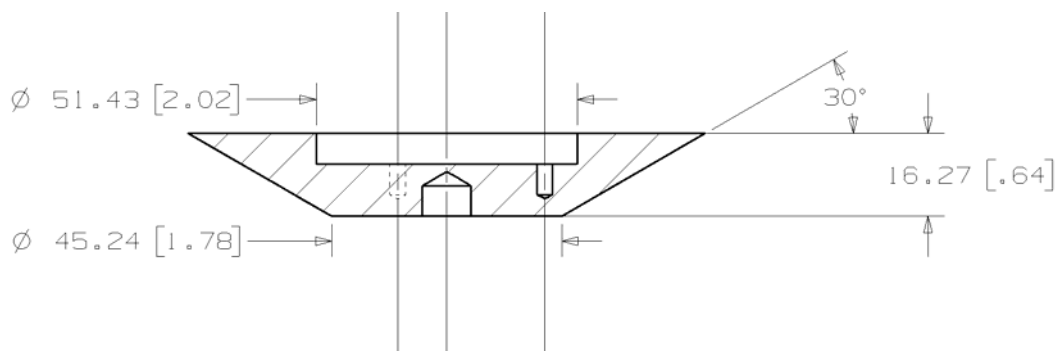


Figura 3.6 Parte dinámica del cojinete neumático. Dimensiones en mm [plg].

Para la parte dinámica (figura 3.7), la superficie superior tiene la misma geometría que la parte estática (cónica complementaria); es decir, tiene una superficie cónica con ángulo de 30° , respecto a la horizontal cuyas dimensiones son las correspondientes a la parte dinámica. Una superficie plana de diámetro 45.23 mm y un diámetro exterior de 101.6 mm. Cuenta con un agujero concéntrico pasado de diámetro 12 mm, para permitir el libre movimiento del eje acoplado a la parte dinámica. En la superficie cónica se tienen 16 agujeros calibrados (espreas) distribuidas de manera equidistante en radios de 33.3 mm y 25.7 mm. Para la superficie plana se distribuyen 6 espreas equidistantes en un radio de 16 mm

respecto al eje axial. En la superficie cilíndrica del agujero concéntrico pasado se alojan 4 espreas, en distancia de 90° una de otra. La distribución de espreas en la parte cónica generan fuerzas de empuje en las direcciones axial y radial en un solo plano, siendo el flujo de aire uniforme en la superficie cónica y la pared cilíndrica del agujero concéntrico. La altura del cojinete es de 40 mm. Para el suministro de aire se tienen 3 agujeros de diámetro 10.2 mm. (1/8" NPT).

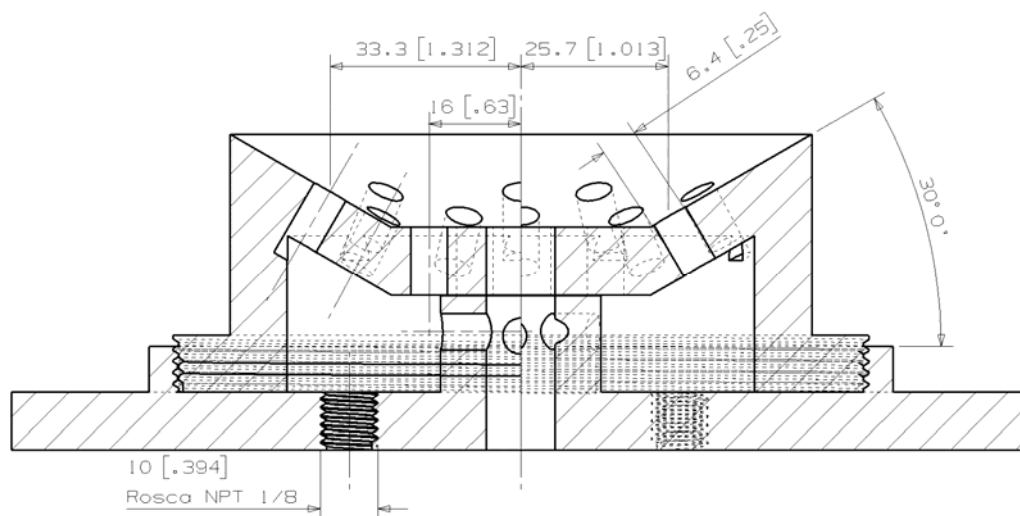


Figura 3.7 Parte estática del cojinete neumático. Dimensiones en mm [plg].

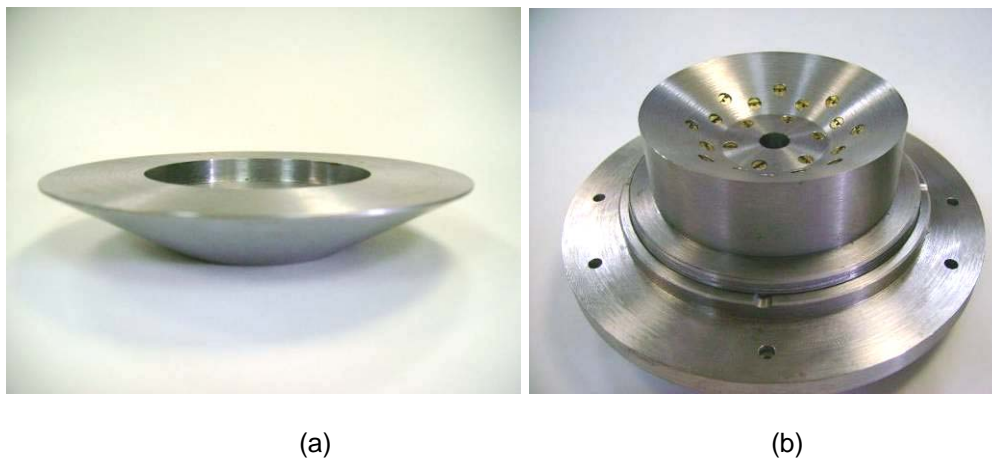


Figura 3.8 Cojinete neumático construido: (a) Parte estática; (b) Parte dinámica

3.1.4 Motor y celda de carga

El motor que provee la velocidad de arrastre es de corriente directa (DC) y cuenta con un codificador incremental angular integrado (figura 3.9), sus características del motor son las siguientes: Corriente nominal de 700 mA, Voltaje nominal de 29.4 V, Potencia de 20.1 W, velocidad angular máxima de 3500 rpm y par de torsión máximo de 0.16 N·m. La elección de un motor de DC permite una mejor respuesta de la velocidad angular y un diseño del circuito de control más simple. El sistema de control mantiene una velocidad de arrastre constante, independiente a la carga ó fluido bajo prueba, utilizando un servo-control de lazo cerrado de tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para obtener una respuesta rápida y constante del motor. Se implementa al sistema un microcontrolador de la familia 18F de Microchip, PIC18F252, de alta velocidad de procesamiento (10 MIPS).



Figura 3.9 Motor DC

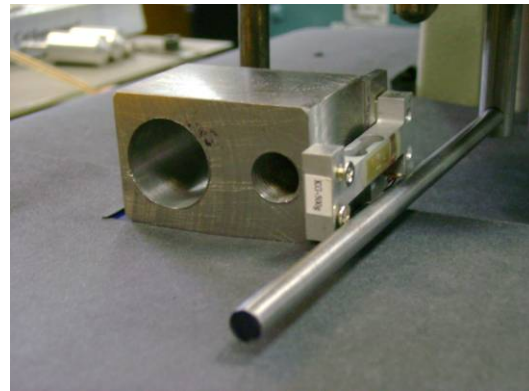


Figura 3.10 Celda de Carga

Para el registro de la fuerza equivalente al momento de giro se utiliza una celda de carga (figura 3.10) con un rango de 0 a 500 gr (0 a 4.9 N) y una resolución de 0.1 gr. En el mismo sistema de control se acondiciona la señal de la celda de carga, la cual entrega 1 mV por cada gramo de peso. El sistema tiene implementado un circuito que reduce el ruido de la señal y amplifica la misma,

teniendo referencias de voltaje compensadas por temperatura y variaciones en la señal de la fuente de alimentación. Con la referencia de voltaje, el circuito transforma las diferencias de éste en un valor de fuerza, por lo que la lectura obtenida de un multímetro es el valor neto de la fuerza en newton (N) como se observa en la figura 3.11.



Figura 3.11 Multímetro donde se obtiene la lectura de fuerza (N).

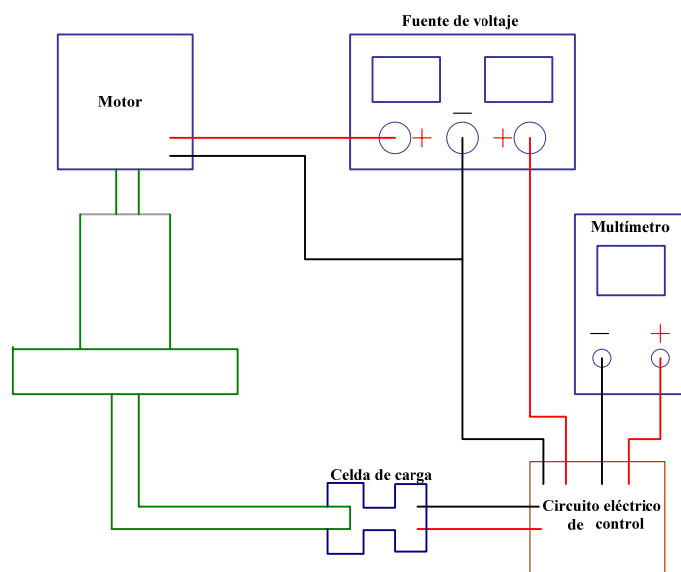


Figura 3.12 Diagrama general del circuito electrónico.

3.2 Calibración

Para la calibración del reómetro se presenta a continuación la descripción de los fluidos newtonianos elegidos, así como una delineación de las condiciones de operación necesarias al momento de realizar las pruebas.

3.2.1 Fluidos de prueba

Se utilizó polietilen glicol (PEG) como fluido de prueba, ya que presenta un comportamiento reológico estable y es de fácil preparación, así como un mínimo cambio en sus propiedades debido a los cambios de temperatura. Es un polímero lineal de óxido de etileno con peso molecular de 20,000 g/mol. El PEG tiene una excelente solubilidad en agua y en solventes orgánicos polares como la acetona y el metanol, lo anterior proporciona condiciones ideales para ser usado en numerosos campos de aplicación. Algunos usos son: lubricante para extrusión y polvos metalúrgicos, lubricante y agente vulcanizador en elastómeros, plastificante y modificador en los procesos de manufactura de plásticos, aditivo en el proceso del papel, madera y celofán, agente solidificador para tabletas de jabón o limpiadores dentales, lubricante y aditivo en preparaciones cosméticas y farmacéuticas, etc.

Para el presente trabajo las soluciones de PEG se prepararon en agua, en concentraciones de 10%, 15%, 20%, 25% y 40% (porcentaje en peso); es decir, por cada 100% de peso neto de la solución de PEG, el porcentaje de la concentración es el porcentaje correspondiente al peso neto y el resto del porcentaje es peso de agua. Las soluciones de PEG fueron dispuestas a un reposo aproximado de 72 h para dejar la solución libre de burbujas de aire atrapadas durante la agitación.

3.2.2 Condiciones de operación

Concluido el ensamble de los cilindros y el cojinete neumático, así como la selección de los fluidos a utilizar en las pruebas, se plantean las condiciones de operación del reómetro, para ser comparadas con los resultados obtenidos en un

reómetro comercial AR-2000 de *TA Instruments*TM utilizando los mismos fluidos de prueba. A continuación se describen dichas condiciones, pruebas y resultados.

La presión mínima de alimentación de aire al cojinete neumático debe estar en un rango de 3 a 6 bares, la copa debe de contener mínimo 16 ml del fluido sujeto a prueba. Se establece una distancia mínima de 13.55 mm entre la punta del rotor y el fondo de la copa, una vez sumergido el rotor en el fluido. El circuito electrónico debe permanecer energizado por espacio de 30 min antes de iniciar el funcionamiento del motor y la celda de carga, con el fin de permitir que cada componente electrónico se encuentre a una temperatura de operación constante y reducir errores de medición de la fuerza equivalente al par.

Una vez que el circuito electrónico se encuentra en un estado permanente, se determina una velocidad de arrastre inicial mínima de 50 rpm, velocidad angular mínima que proporciona el motor en uso. Se da un tiempo necesario para que el flujo se encuentre en un estado permanente, alrededor de 10 min, y comenzar el registro de la fuerza equivalente al par. Un registro promedio de 10 lecturas por velocidad de arrastre propuesta se efectúan antes de incrementar la velocidad de arrastre. Al establecer una velocidad se verifica que el fluido no presente un flujo secundario como el descrito en la sección 2.2, lo que garantiza una lectura con menores oscilaciones.

Para cada concentración de PEG se establecen diferentes intervalos e incrementos de velocidades de arrastre, siendo más amplios para concentraciones de porcentaje bajo como lo es 10% y 15%. En las concentraciones de 20%, 25% y 40% los rangos son menores.

- PEG 10%, velocidades de arrastre establecidas; 400, 500, 600 y 700 (rpm).

- PEG 15%, velocidades de arrastre establecidas; 100, 200, 250, 300, 400, 450 y 500 (rpm).
- PEG 20%, velocidades de arrastre establecidas; 50, 70, 100, 150, 200, 250 y 300 (rpm).
- PEG 25%, velocidades de arrastre establecidas; 50, 70, 80, 90, 100, 110 y 140 (rpm).
- PEG 40%, velocidades de arrastre establecidas; 50, 60, 70, 100, 110, 120, 160, 200 y 220 (rpm).

En cada prueba se registra la fuerza equivalente al par de torsión (F), la longitud del brazo de palanca (d) y la velocidad angular del rotor (Ω_{int}) para un mismo instante. Con los valores que se obtienen y los valores constantes, como lo son el radio interior de la copa (R) y la constante de proporcionalidad entre los radios de cilindros (k), se calcula la viscosidad utilizando la ecuación (2.16).

Capítulo 4

Resultados

4.1 Análisis de resultados

Se realiza un promedio de los valores de la viscosidad, a diferentes velocidades de arrastre, por cada concentración de PEG. Esto con el fin de ser comparadas las viscosidades experimentales del reómetro en desarrollo con las viscosidades (reales) obtenidas en un reómetro comercial (*AR-2000, TA Instruments™*) y obtener una curva de calibración, ver tabla 3.1.

Tabla 4.1 Valores de la viscosidad real y experimental del PEG, concentraciones 10, 15, 20, 25 y 40 (%).

Concentración de PEG (%)	Viscosidad real [Pa·s] (Reómetro <i>ARES</i>)	Viscosidad experimental [Pa·s]	Variación en %
10	0.0189*	0.0526 *	178%
15	0.0437*	0.0555 *	27%
20	0.1118*	0.1281 *	14%
25	0.2432*	0.2975 *	22%
40	1.5546*	1.1285 *	27%

*Promedio de viscosidad a diferentes velocidades de arrastre.

En la tabla anterior se puede observar que para el PEG al 10% el porcentaje de diferencia entre el valor de la viscosidad real y la experimental es aproximadamente del 170%, para el PEG al 15% el porcentaje es menor, 27%. En el caso del PEG al 20% el porcentaje es el menor de las pruebas realizadas, 12 % aproximadamente. En la mayoría de las pruebas realizadas el porcentaje de diferencia es de alrededor del 25%. En la figura 3.10 se presenta la gráfica de la curva de calibración, así como la ecuación de corrección y el factor de confiabilidad (R^2), siendo este último del 99.18% de confianza (regresión lineal realizada por software de cálculo).

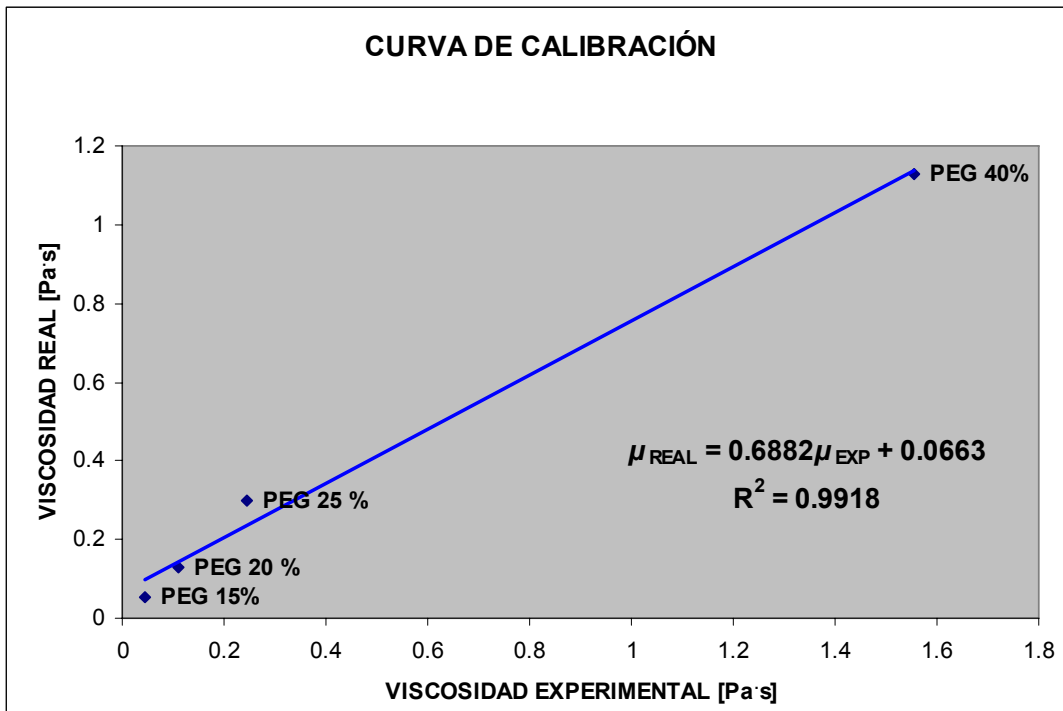


Figura 4.1 Curva de calibración del reómetro desarrollado.

Una desventaja de la configuración empleada en el presente trabajo es la longitud del brazo de palanca. En particular al efectuar la prueba utilizando la concentración de 10% del PEG, ya que la celda de carga registra un valor mínimo

que proporciona lecturas de fuerza inconsistentes. Cabe señalar que la longitud del brazo de palanca estaba limitada por la interferencia de este con los dispositivos del circuito electrónico, por tal motivo el valor promedio de la viscosidad del PEG al 10% no se contempla al graficar la curva debido a la diferencia tan marcada entre la viscosidad real y la viscosidad experimental.

Conclusiones

En esta tesis se presentó el desarrollo del prototipo de un reómetro de cilindros concéntricos, cuya característica principal es lo simple del arreglo del brazo de palanca acoplado al eje axial del cojinete neumático y un libre contacto con la celda de carga. Por lo anterior, la recuperación de los valores de fuerza equivalente al par de torsión se realizan en el cilindro exterior, a diferencia de los reómetros comerciales que cuantifican la pérdida de potencia en el motor acoplado al cilindro interior. Con el cojinete neumático se reduce la fuerza de fricción al rotar el cilindro exterior, gracias al colchón de aire entre la parte estática y dinámica del cojinete.

Dado lo anterior, el objetivo principal de esta tesis fue desarrollar un reómetro en su fase inicial, estudiando fluidos newtonianos como lo es el PEG y obteniendo valores puntuales, por lo que el prototipo se limita a un viscosímetro en la fase mencionada.

Para esta primera fase, se realizaron pruebas con fluidos newtonianos: PEG en diferentes concentraciones. Cada fluido fue sometido a diferentes velocidades de arrastre preestablecidas ($\dot{\gamma}$). Los resultados de las pruebas indican que el reómetro no es capaz de evaluar viscosidades cercanas a los 0.0189 Pa·s, debido a que la resolución de la celda de carga no es la óptima para la longitud de brazo de palanca establecida en las pruebas realizadas, pero su desempeño en la evaluación de viscosidades más altas cumplen satisfactoriamente con los valores de viscosidad promedio de un reómetro comercial. Un rango preliminar de viscosidades es de 0.047 a 1.550 Pa·s en una ventana de velocidades de arrastre que va desde las 70 rpm hasta las 600 rpm, ya

que el motor tenía una velocidad mínima de 50 rpm una vez que el rotor era sumergido en el fluido y la parte dinámica del cojinete neumático presentaba un comportamiento inestable para velocidades superiores a las 600 rpm, a simple vista se observaba vibración en la parte dinámica del cojinete neumático y el brazo de palanca oscilaba en referencia a una línea virtual de referencia horizontal, causando inconsistencias en las lecturas de fuerza. Con base en lo anterior se concluye que el prototipo del reómetro propuesto cumple satisfactoriamente su función de evaluar viscosidades en fluidos newtonianos, bajo el sistema propuesto de recuperación de datos del cilindro exterior a través de un brazo de palanca y una celda de carga.

Los resultados obtenidos hasta el momento pueden ser mejorados al profundizar en la caracterización del cojinete neumático; presión mínima de libre giro, colchón de aire mínimo, evaluación de la distribución de las espreas, etc. Asimismo, si se considera un rodamiento neumático para el eje axial del rotor que permita un acoplamiento flexible entre el cilindro interior y el motor, con el fin de permitir una mayor estabilidad de giro y garantizar una mayor concentricidad de los cilindros y el cojinete neumático.

La capacidad de medición del prototipo puede ser mejorada al elegir una nueva celda de carga con mayor resolución que permita registrar fuerzas de menor rango y evaluar viscosidades cercanas a los 0.018 [Pa·s]. O bien, para obtener dichos valores registrar la fuerza utilizando una longitud de brazo de palanca menor a la propuesta en esta tesis.

Por otro lado, se requiere de una evaluación comercial detallada que permita determinar el costo/beneficio real del equipo para una posible comercialización del mismo.

Apéndice

Ley de viscosidad de Newton en coordenadas cilíndricas (r, θ, z);

$$\tau_{rr} = -\mu \left[2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] + \left(\frac{2}{3}\mu - \kappa \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (\text{B.1-8})^a$$

$$\tau_{\theta\theta} = -\mu \left[2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right) \right] + \left(\frac{2}{3}\mu - \kappa \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (\text{B.1-9})^a$$

$$\tau_{zz} = -\mu \left[2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + \left(\frac{2}{3}\mu - \kappa \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (\text{B.1-10})^a$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = -\mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] \quad (\text{B.1-11})$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = -\mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right] \quad (\text{B.1-12})$$

$$\tau_{zr} = \tau_{rz} = -\mu \left[\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] \quad (\text{B.1-13})$$

$$(\nabla \cdot \mathbf{v}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (\text{B.1-14})$$

Ecuación de Continuidad en coordenadas cilíndricas (r, θ, z);

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (\text{B.4-2})$$

Fuente: Bird, R. B., Stewart W.E., y Lightfoot, E. N. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de Norteamérica, 2002. Segunda edición.

Ecuación de Movimiento para un fluido newtoniano con densidad y viscosidad constantes, en coordenadas cilíndricas (r, θ, z);

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} \right) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right] + \rho g_r \end{aligned} \quad (\text{B.6-4})$$

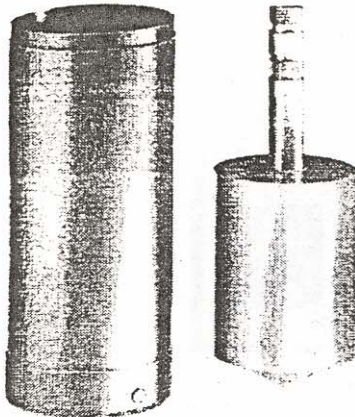
$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right) = \\ & = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] + \rho g_\theta \end{aligned} \quad (\text{B.6-5})$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \end{aligned} \quad (\text{B.6-6})$$

Fuente: Bird, R. B., Stewart W.E., y Lightfoot, E. N. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de Norteamérica, 2002. Segunda edición.

Geometría de cilindros concéntricos bajo norma DIN 53019

Measuring Ranges



6.5 Sensor System MV DIN / SV DIN

The sensor system has been standardized for viscosity measurements of water based plastic dispersions (DIN 53 788), and of paints (DIN 53 214).

This coaxial cylinder sensor system consists of the cup MV and the rotor MV DIN or the cup SV and the rotor SV DIN.

This sensor system meets the requirements of the German Standard DIN 53 019 for rotational viscometers.

DIN 53 019 defines the characteristic geometrical ratios as follows:

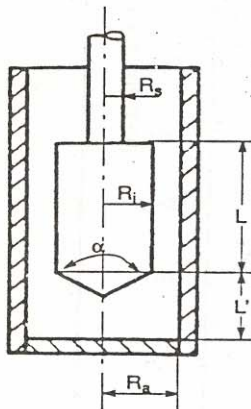
$$\frac{R_a}{R_i} = 1.0847$$

$$\frac{R_s}{R_i} \leq 0.3$$

$$\frac{L}{R_i} = 3$$

$$\frac{L'}{R_i} = 1$$

$$\alpha = 120^\circ (2.094 \text{ rad}) \pm 1^\circ$$



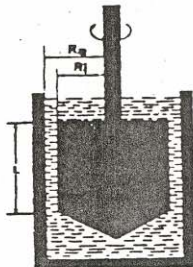
The sensor system should also be used when samples are subjected to programmed temperature increases and decreases. These temperature changes will only lead to the temperature related change of the sample volume in this sensor system. Its influence on the viscosity measurement will be small unless an insufficiently overfilled cup leads to a just partly filled annular gap when the temperature drop is very low.

Cleaning:

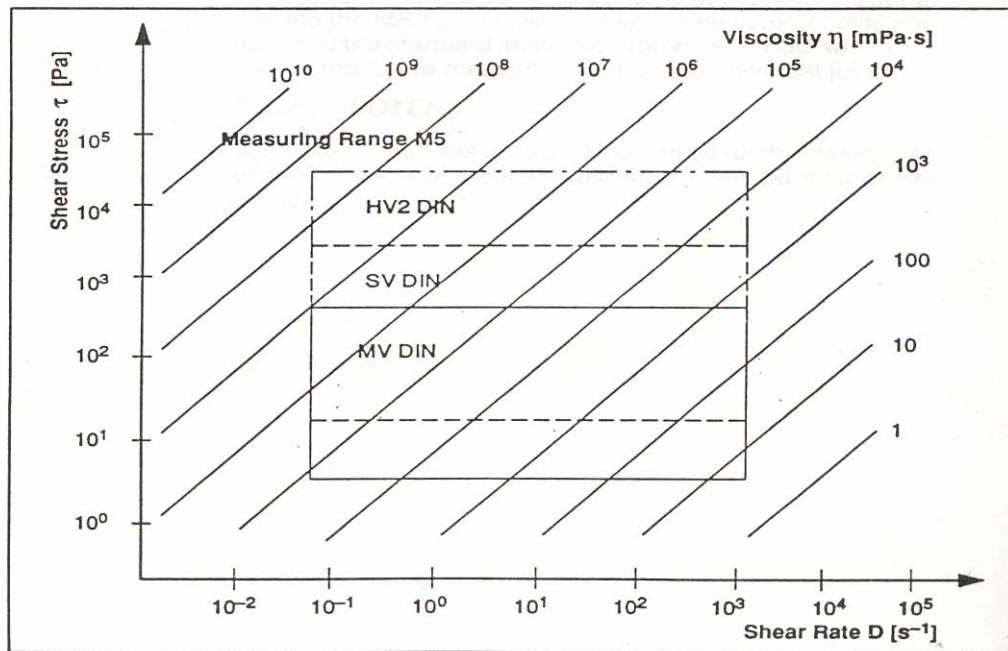
The bottom of the cup can be removed. (Order No. for the sealing ring of the MV Beaker: 807-0458)

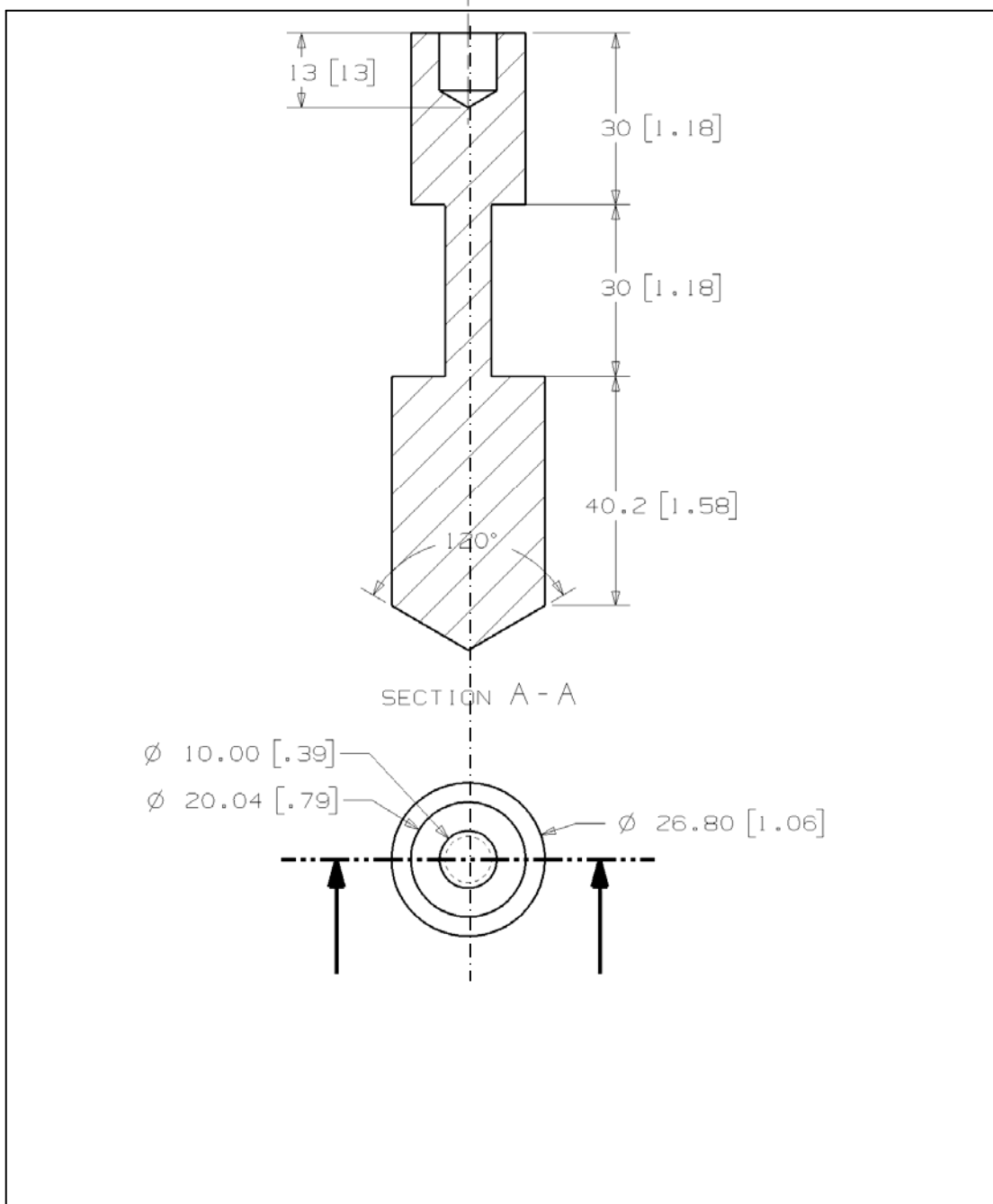
Rango de mediciones de viscosidad utilizando la geometría de cilindros concéntricos



Measuring Ranges

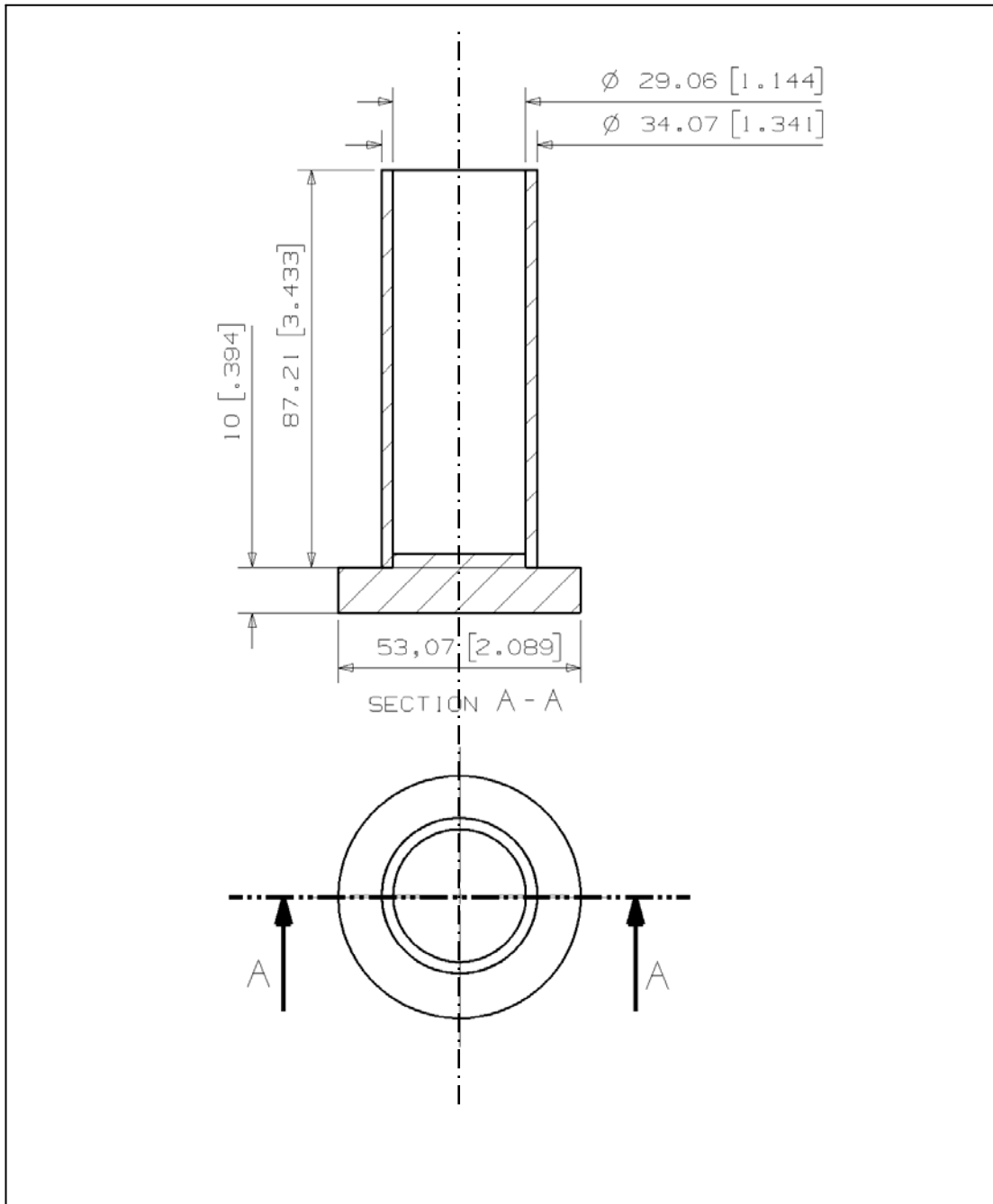




Sensor System DIN 53019	MV DIN	SV DIN	HV2 DIN
Inner Cylinder (Rotor)			
Radius R_i [mm]	19.36	10.65	4.0
Height L [mm]	58.08	31.45	11.8
Outer Cylinder (Cup)			
Radius R_a [mm]	21	11.55	4.35
Radii Ratio R_a / R_i	1.0847	1.0847	1.0847
Gap Width [mm]	1.64	0.9	0.39
Sample Volume V [cm ³]	46	14	0.7
Temperature [°C]	-30/100		
Factors M5/M5-Osc			
A (Pa/% τ)	3.01	18.1	345
M (s ⁻¹ /D%)	6.45	6.45	6.45
Factors M10			
A (Pa/% τ)	6.05	36.2	690
M (s ⁻¹ /D%)	12.9	12.9	12.9

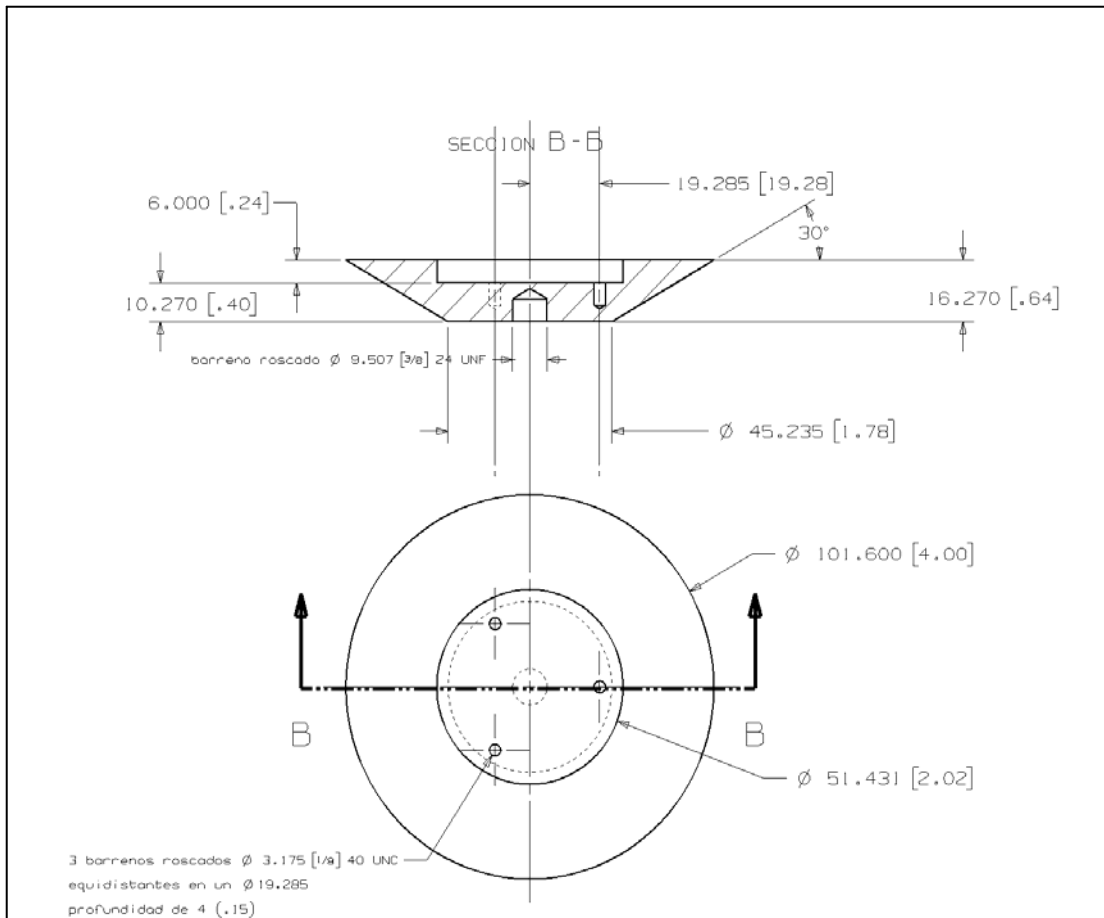





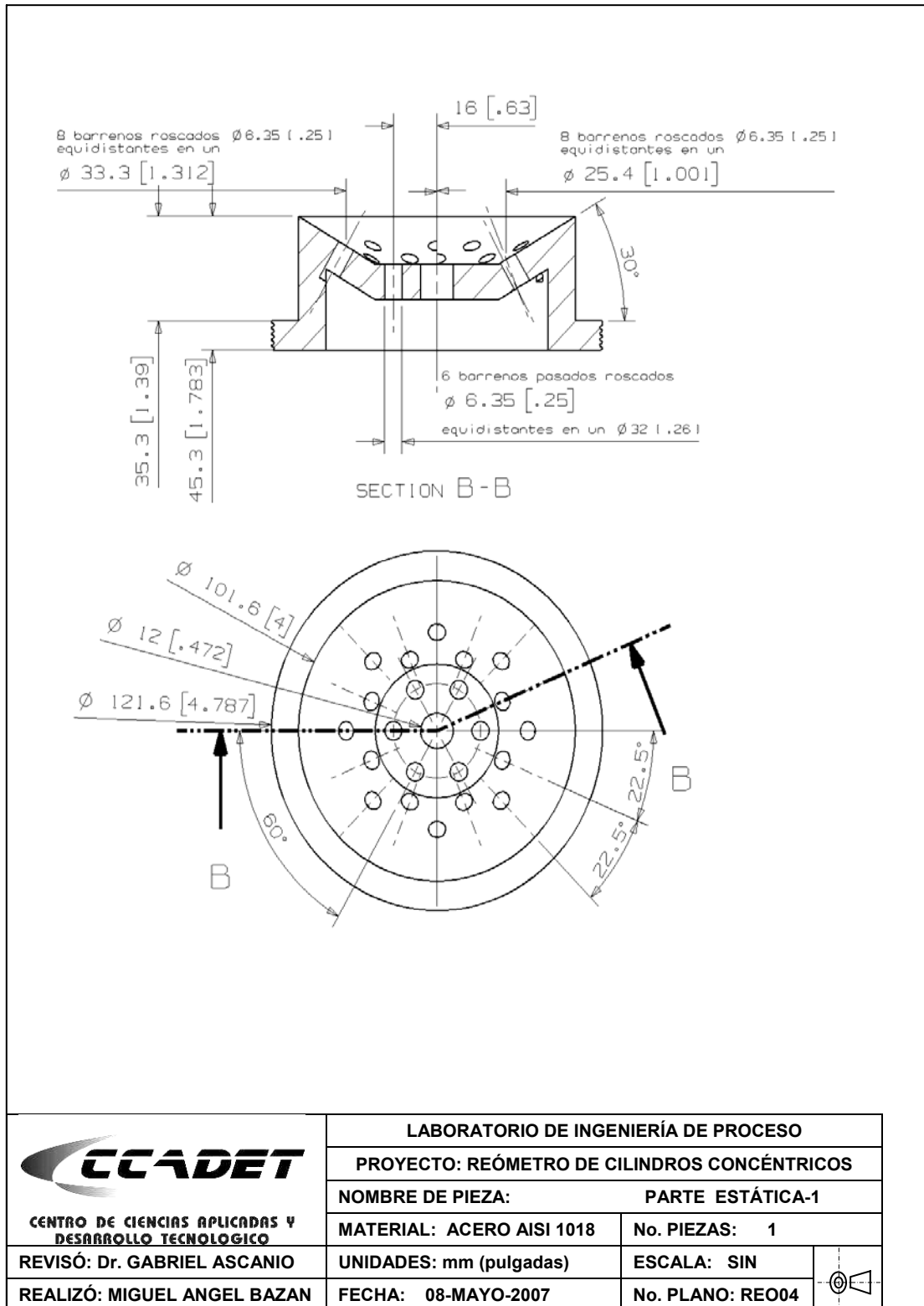
 CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	LABORATORIO DE INGENIERÍA DE PROCESO		
	PROYECTO: REÓMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS		
REVISÓ: Dr. GABRIEL ASCANIO REALIZÓ: MIGUEL ANGEL BAZAN	NOMBRE DE PIEZA: ROTOR		
	MATERIAL: ACERO INOXIDABLE AISI 304	No. PIEZAS: 1	
UNIDADES: mm (pulgadas)	ESCALA: SIN	No. PLANO: REO01	
FECHA: 08-MAYO-2007			

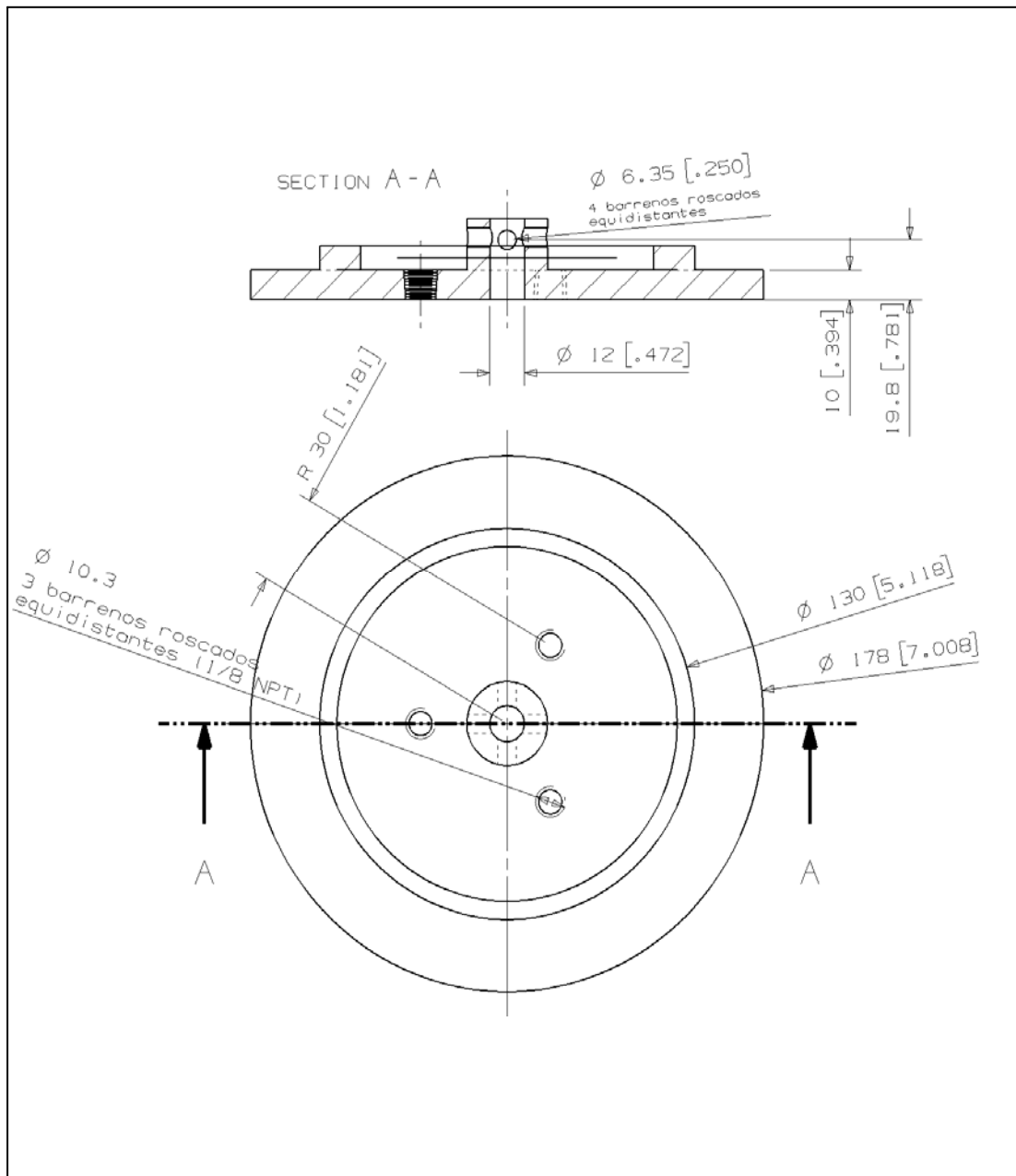




 CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	LABORATORIO DE INGENIERÍA DE PROCESO	
	PROYECTO: REÓMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS	
	NOMBRE DE PIEZA:	COPA
	MATERIAL: ACERO INOXIDABLE AISI 304	No. PIEZAS: 1
REVISÓ: Dr. GABRIEL ASCANIO	UNIDADES: mm (pulgadas)	ESCALA: SIN
REALIZÓ: MIGUEL ANGEL BAZAN	FECHA: 08-MAYO-2007	No. PLANO: REO02
		

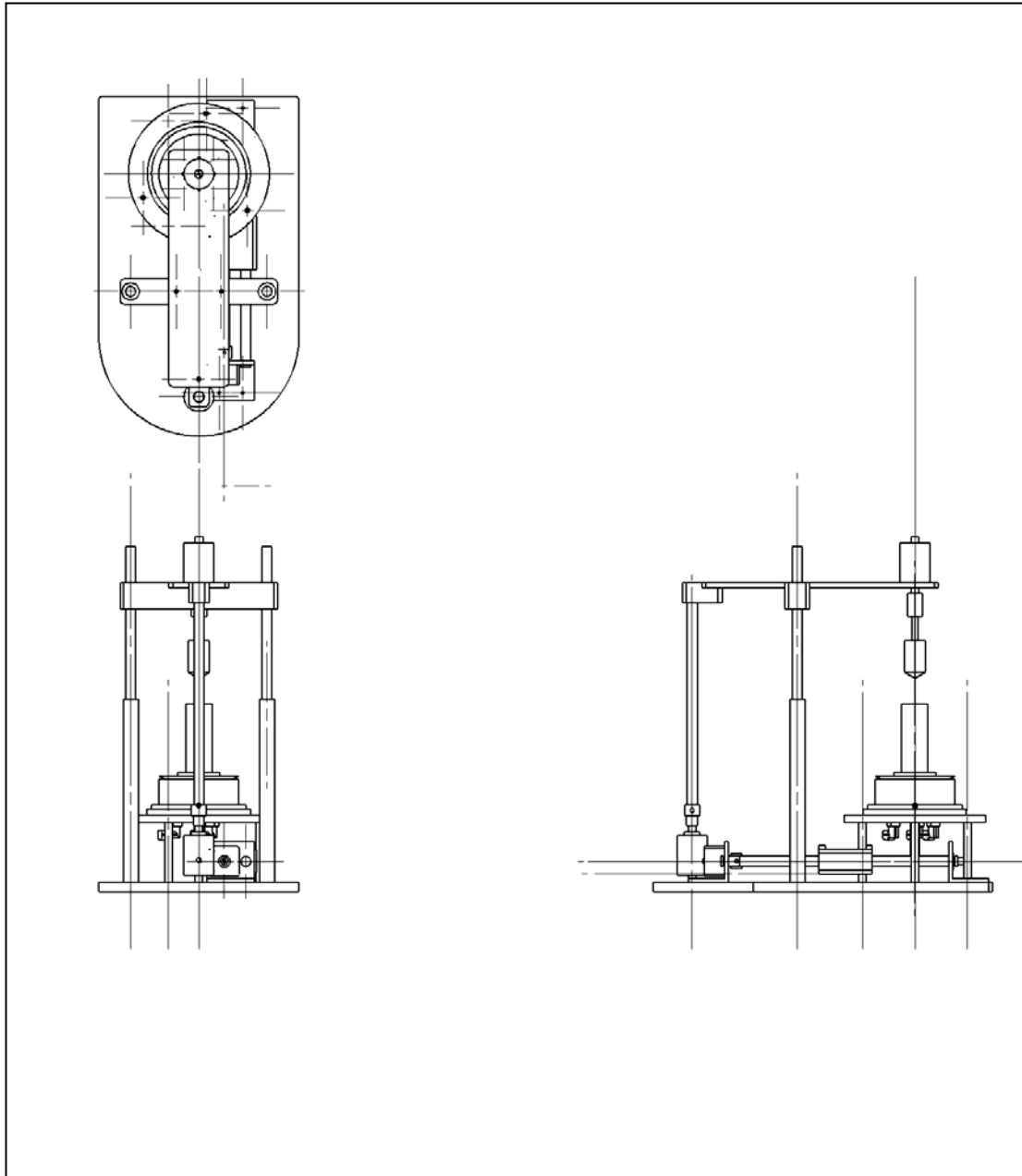




 CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	LABORATORIO DE INGENIERA DE PROCESO	
	PROYECTO: REÓMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS	
	NOMBRE DE PIEZA:	PARTE DINÁMICA
	MATERIAL: ACERO AISI 1018	No. PIEZAS: 1
REVISÓ: Dr. GABRIEL ASCANIO	UNIDADES: mm (pulgadas)	ESCALA: SIN
REALIZÓ: MIGUEL ANGEL BAZAN	FECHA: 08-MAYO-2007	No. PLANO: REO03

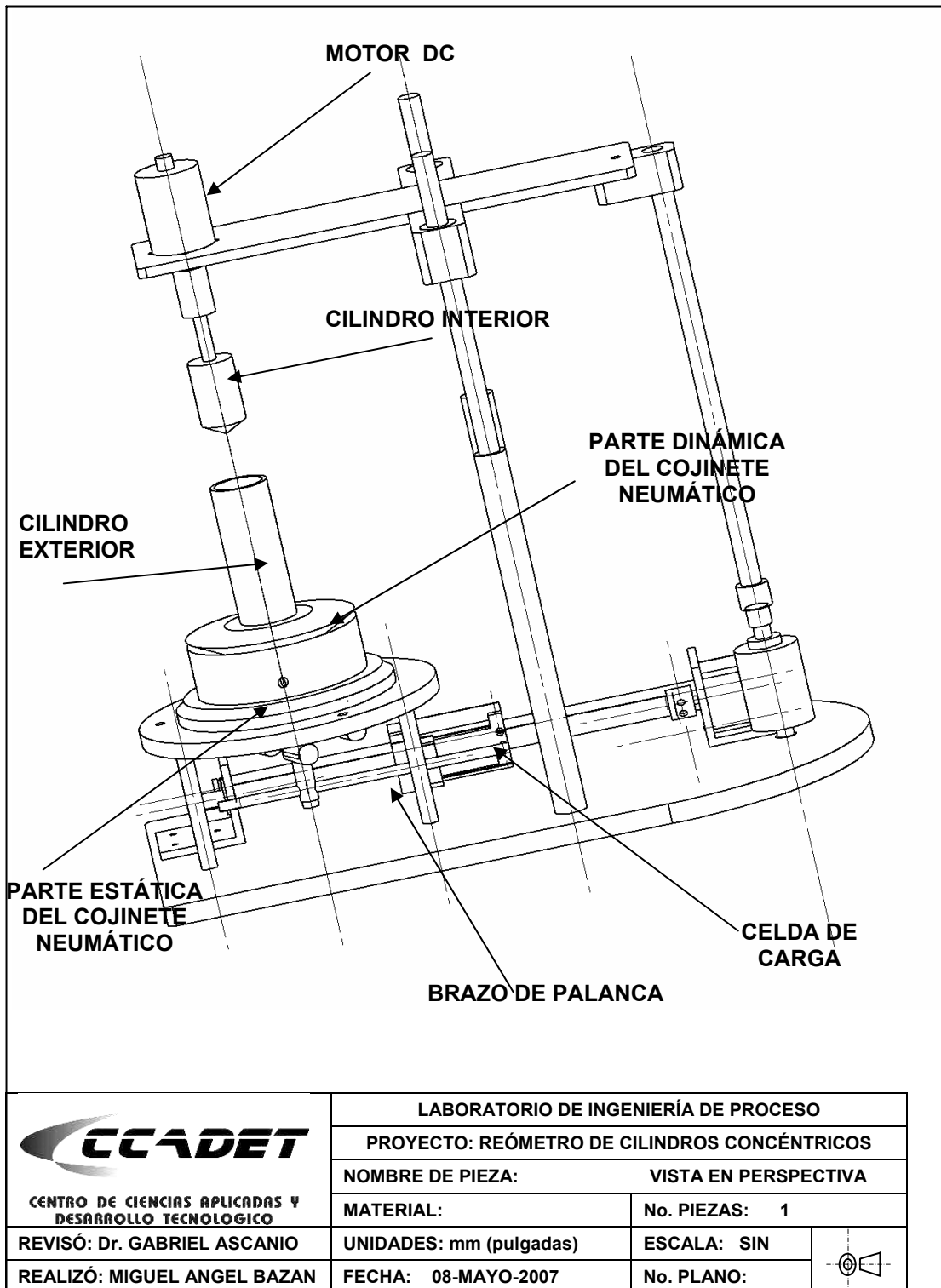






 CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	LABORATORIO DE INGENIERÍA DE PROCESO		
	PROYECTO: REÓMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS		
	NOMBRE DE PIEZA:	PARTE ESTÁTICA-2	
	MATERIAL: ACERO AISI 1018	No. PIEZAS: 1	
REVISÓ: Dr. GABRIEL ASCANIO	UNIDADES: mm (pulgadas)	ESCALA: SIN	
REALIZÓ: MIGUEL ANGEL BAZAN	FECHA: 08-MAYO-2007	No. PLANO: REO05	



 <p>CCADET CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO</p>	LABORATORIO DE INGENIERÍA DE PROCESO		
	PROYECTO: REÓMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS		
	NOMBRE DE PIEZA:		VISTAS PROYECTADAS
	MATERIAL:	No. PIEZAS: 1	
	UNIDADES: mm (pulgadas)	ESCALA: SIN	
REALIZÓ: MIGUEL ANGEL BAZAN	FECHA: 08-MAYO-2007	No. PLANO:	



 <p>CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO</p>	LABORATORIO DE INGENIERÍA DE PROCESO		
	PROYECTO: REÓMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS		
	NOMBRE DE PIEZA:	VISTA EN PERSPECTIVA	
	MATERIAL:	No. PIEZAS:	1
REVISÓ: Dr. GABRIEL ASCANIO	UNIDADES: mm (pulgadas)	ESCALA: SIN	
REALIZÓ: MIGUEL ANGEL BAZAN	FECHA: 08-MAYO-2007	No. PLANO:	

Datos técnicos de la celda de carga (bascula EKS de bolsillo)

Balance de poche
Taschenwaage
Pocket Scale



<p>GB / Pocket Scale</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacity 500g/17.65oz/7716gn/321.5dwt • Graduation 0.1g/0.01oz/2gn/0.1dwt • Calibration function • Piece counting function • Stainless steel platform • Handy size 	<p>NL / Zakweegschaal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maximumgewicht 500g/17.65oz/7716gn/321.5dwt • Schaalverdeling 0.1g/0.01oz/2gn/0.1dwt • Calibreerfunctie • Telfunctie voor het aantal delen • Weegvlak uit roestvrij staal • Handig formaat
<p>FR / Balance de poche</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacité 500g/17.65oz/7716gn/321.5dwt • Graduation 0.1g/0.01oz/2gn/0.1dwt • Fonction d'étalonnage • Fonction de comptage de pièces • Surface de pesage en acier inoxydable • Maniable de par la taille 	<p>IT / Bilancia tascabile</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peso massimo 500g/17.65oz/7716gn/321.5dwt • Graduazione 0.1g/0.01oz/2gn/0.1dwt • Taratura • Funzione contapezzi • Piano in acciaio inox • Formato maneggevole
<p>DE / Taschenwaage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tragkraft 500g/17.65oz/7716gn/321.5dwt • Teilung 0.1g/0.01oz/2gn/0.1dwt • Kalibrierfunktion • Stückzählfunktion • Wiegefläche aus Edelstahl • Praktisches Format 	<p>ES / Báscula de bolsillo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peso Máximo 500g/17.65oz/7716gn/321.5dwt • Graduación 0.1g/0.01oz/2gn/0.1dwt • Calibración • Función cuentapiezas • Plataforma de acero inoxidable • Tamaño manejable




Fuente: EKS/POCK:S/401/SEU.1/2006-9

Datos técnicos del motor (C9SA20E)

■ RATINGS AND SPECIFICATIONS

Item	Motor Type UGFMED-	C9SA20E	C9EA20E	C9MA20E
Rated Output	W	20.1	26.4	35.2
Rated Torque	N·m (oz·in)	0.16 (22.7)	0.21 (29.8)	0.28 (39.8)
Rated Speed	r/min	1200	1200	1200
Rated Voltage	V	29.4	30	30.7
Rated Current	A	1.5	1.8	2.1
Rated Power Rate	kW/s	1.66	2.24	2.76
Rated Angular Acceleration	rad/s ²	10400	10660	9850
Instantaneous Peak Torque	N·m (oz·in)	0.41 (58.4)	0.56 (79.4)	0.93 (132)
Instantaneous Peak Current	A	3.4	4.2	6.0
Instantaneous Max. Speed	r/min	3500	3500	3000
Moment of Inertia J _M (=GD ² /4)	kg·m ² (oz·in ²)	1.54 × 10 ⁻⁶ (2.18 × 10 ⁻³)	1.97 × 10 ⁻⁶ (2.79 × 10 ⁻³)	2.84 × 10 ⁻⁶ (4.03 × 10 ⁻³)
Armature Winding Resistance	Ω	7.0	5.5	4.1
Armature Inductance	mH	6.7	6.3	5.4
Induced Voltage constant	V/1000 (r/min)	12.9	14.3	16.6
Torque Constant	N·m/A (oz·in/A)	0.123 (17.5)	0.136 (19.4)	0.158 (22.5)
Friction Torque	N·m (oz·in)	0.0078 (1.1)	0.011 (1.53)	0.016 (2.22)
Viscous Damping Coefficient	N·m/ (r/min) (oz·in/ (r/min))	3.04 × 10 ⁻⁶ (4.31 × 10 ⁻⁴)	4.31 × 10 ⁻⁶ (6.12 × 10 ⁻⁴)	6.76 × 10 ⁻⁶ (9.59 × 10 ⁻⁴)
Inertia Time Constant	ms	7.1	5.8	4.6
Inductive Time Constant	ms	0.96	1.1	1.3
Approx. Mass	g (oz)	575 (20.3)	690 (24.3)	885 (31.2)

- Time Rating: Continuous
- Withstand Voltage: 500VAC/1 min
- Ambient Conditions
 - Location: Indoor
 - Temperature: - 10 to + 40℃
 - Humidity: 80% RH Max.

- Direction of Rotation:
 - When (+) voltage is supplied to terminals with red cap, it rotates counterclockwise (CCW) from the drive end.
- Allowable Thrust Load: 19.6N (4.4lb) or below
- Allowable Radial Load: 15mm (0.60in) from the surface, 49N (11lb) or below

Fuente: Catálogo Minertia Motor F series, YASKAWA™

Technical data on polyethylene glycols

Type	Product form	Molar mass g/mol	Functionality	Hydroxyl value (DIN 53240) mg KOH / g	Solidification point EP III °C	Viscosity at 20°C (50% aqueous solution) mPas	Density at 20°C (DIN 51757) g / cm ³	pH at 5% (DIN 19208)	Water content (DIN 51777) % (m / m)	Refractive index n _D ²⁰ (DIN 51423) (± 0.002)	Residual EO mg / kg	Residual Dioxan mg / kg	Maximum solubility in water at 20°C %m / m	Vapour pressure at 20°C hPa	Oxide ash (DIN 51575) %m / m	INCI designation	Application characteristics
8000 FL	Melt	7,000–9,000	Dihydroxy-	12–16	55–60	290–450	1.20 (melt)	5.0–7.0	max. 0.1	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	54	< 0.01	max. 0.05	PEG-180	Product form with reduced water content for chemical syntheses
8000 PF	Fine powder	7,000–9,000	Dihydroxy-	12–16	55–60	290–450	1.20 (melt)	5.0–7.0	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	54	< 0.01	max. 0.05	PEG-180	Powdered binder / pressing agent, dry mixtures / plastics additive, particle size approx. 10–200 µm
10000 S	Flakes	9,000–11,250	Dihydroxy-	10–12	55–60	550–750	1.20 (melt)	5.0–7.0	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	53	< 0.01	max. 0.05	PEG-220	Humectant / binder / release- / processing agent / synthesis / aqueous solutions
10000 P	Powder	9,000–11,250	Dihydroxy-	10–12	55–60	550–750	1.20 (melt)	5.0–7.0	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	53	< 0.01	max. 0.05	PEG-220	Powdered binder / pressing agent, dry mixtures / plastics additive, particle size approx. 50–400 µm
12000 S	Flakes	10,500–15,000	Dihydroxy-	7.5–11.0	56–60	1,100–1,400	1.20 (melt)	5.0–7.0	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	53	< 0.01	max. 0.05	PEG-240	Humectant / binder / release- / processing agent / synthesis / aqueous solutions
12000 P	Powder	10,500–15,000	Dihydroxy-	7.5–11.0	56–60	1,100–1,400	1.20 (melt)	5.0–7.0	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	53	< 0.01	max. 0.05	PEG-240	Powdered binder / pressing agent, dry mixtures / plastics additive, particle size approx. 50–400 µm
20000 S	Flakes	min 18,000	Dihydroxy-	max. 7	min. 57	2,700–3,500	1.20 (melt)	4.5–7.5	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	52	< 0.01	max. 0.05	PEG-450	Binder / release- / processing agent / synthesis / plastics additive
20000 P	Powder	min 18,000	Dihydroxy-	max. 7	min. 57	2,700–3,500	1.20 (melt)	4.5–7.5	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	52	< 0.01	max. 0.05	PEG-450	Powdered binder / pressing agent, dry mixtures / plastics additive, particle size approx. 50–400 µm
20000SR	Flakes	min 18,000	Dihydroxy-	max. 7	min. 57	2,700–3,500	1.20 (melt)	4.5–7.5	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	52	< 0.01	max. 0.05	PEG-450	Binder / pressing agent for ceramics applications / thermooxidative stabilization
20000SRU	Flakes	min 18,000	Dihydroxy-	max. 7	min. 57	2,700–3,500	1.20 (melt)	5.0–7.5	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	52	< 0.01	max. 0.05	PEG-450	Reduced alkali content for synthesis and polyurethane applications / plastics additive
35000 S	Flakes	approx. 35,000	Dihydroxy-	max. 4	min. 57	11,000–14,000	1.20 (melt)	5.0–7.0	max. 0.5	1.458 (70°C)	max. 1	max. 1	50	< 0.01	max. 0.05	PEG-800	Binder / release- / processing agent / synthesis / plastics additive

Fuente: Información de producto, Glicoles polietileno/polialcalino, Clariant.

Datos técnicos del polietilén glicol

Referencias

[1] Macosko, C. W. Rheology. Wiley-VCH. Estados Unidos de Norteamérica, 1994. pp. 181-183, 188-204, 337-338, 342-344.

[2] Méndez, M. G. Introducción a la Reología. Instituto Politécnico Nacional. México, 2001. pp. 9-53, 59-77.

[3] Bird, R. B., Stewart W.E., y Lightfoot, E. N. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de Norteamérica, 2002. Segunda edición. pp. 89-93.

[4] Carreau, P. J., De Kee, C. R., y Chhabra R. P. Rheology of polymeric systems, Principles and Applications. Publicaciones Hanser/Gardner, Inc., Cincinnati. Alemania, 1997. pp. 76-86.

[5] Huilgol, R.R. and Phan-Thien, N. Fluid Mechanics of viscoelasticity, General Principles, Constitutive Modeling, Analytical and Numerical Techniques. Elsevier Science B. V. Holanda, 1997. pp 40-46, 280-299.

[6] Velázquez, J.C., Damián R., Bernal, E., y Ascanio, G. Sistema digital para la medición de la viscosidad en fluidos newtonianos y aceites minerales en un reómetro de cilindros concéntricos. Memorias, Congreso de Instrumentación SOMI XXII, 2007.

- [7] Cava, C.J. Diseño y caracterización de una máquina lapeadora, con el plato acoplado a un cojinete neumático. UNAM. México, 1998. pp. 63-70, 109-111.
- [8] <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3109/2/36335-2.pdf>. Caracterización y propiedades anticorrosivas de pinturas marinas modificadas con polímeros conductores, Sumario anexos. Recuperado el día 30 julio del 2007.
- [9] <http://www.brookfieldengineering.com/products/rheometers/laboratory-rs-cone-plate.asp> R/S Plus, Rheometers. Recuperado el día 26 de junio del 2007.
- [10] <http://www.thermo.com/com/cda/landingpage/0,10255,1309,00.htm> HAAKE Viscotester® 550, Sistema del viscosímetro. Recuperado el día 29 de junio del 2007.
- [11] <http://www.thermo.com/com/cda/landingpage/0,10255,1309,00.htm> HAAKE Series 1. La versatilidad del concepto del reómetro. Recuperado el día 29 de junio del 2007.
- [12] <http://www.tainstruments.com/default.aspx?siteid=11> TA Instruments, Rheometers. Recuperado el día 29 de junio del 2007.
- [13] <http://www.malvern.com/LabEng/products/bohlin/rheometers.htm> Bohlin CVO, Instrumentos reológicos respaldados con experiencia reológica. Recuperado el día 29 de junio del 2007.

Referencias

[14] <http://www.malvern.com/LabEng/products/bohlin/rheometers.htm> Bohlin, Visco 88. Instrumentos respaldados con experiencia reológica. Recuperado el día 29 de junio del 2007.

[15] <http://www.clariant.com/C125691A003596E5/vwLookupDownloads> Clariant. Recuperado el día 7 de noviembre del 2007.

[16] HAAKE. Manual de usuario Rotovisco® RV20, Sistema de medición M. Alemania. pp. 20-25, 35-36.

[17] DIN 53019-1. Determinación de viscosidad y curvas de flujo utilizando diseños de viscosímetros rotatorios con sistemas de medición de geometría estándar. Instituto Alemán para la estandarización (DIN). Alemania, 1980-05.

[18] ISO 3219. Plásticos. Resinas/plásticos en estado líquido como emulsiones o dispersiones. Determinación de la viscosidad usando viscosímetro rotacional con velocidad de corte controlada. Organización Internacional de Estandarización (ISO), 1993.