



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE BARCELONA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de
Barcelona

T E S I S

para la obtención del grado de

DOCTOR INGENIERO

HIDRODINAMICA DE LOS FLUIDOS NO-NEWTONIANOS.

APLICACION AL DERRAME EN UN MEDIO POROSO.

Dirigido por D. LUIS VIRTO ALBERT
(Dr. Ing. Ind.)

-BARCELONA-
Enero de 1976

Realizado por D. MANUEL A. SOLER MANUEL
(Ing. Ind.)

- A LA MEMORIA DE MI PADRE -

I N D I C E

I N D I C E

	<u>Página</u>
AGRADECIMIENTO	12.-
INTRODUCCION	15.-

PRELIMINAR

LOS FLUIDOS REOLOGICOS EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA. PROBLEMATICA QUE PRESENTAN. SONDEO ESTADISTICO.	27.-
1.- Introducción	28.-
2.- Empresas encuestadas	33.-
3.- Descripción de los impresos de la encuesta	34.-
3.1 - Impreso informativo	34.-
3.2 - Impreso base de la encuesta	34.-
4.- Comentarios al cuestionario	36.-
4.1 - Finalidades.	36.-
4.2 - Controles	39.-
5.- Realización del sondeo	41.-
6.- Resultados	43.-
6.1 - Resultados porcentuales	43.-
6.2 - Los fluidos con problemática	47.-
6.3 - Conclusiones generales	48.-

CAPITULO I

FLUIDOS NO NEWTONIANOS: CARACTERISTICAS, PARAMETROS Y FUNCIONES REOLOGICAS.

1.1.- La deformación de la materia	52.-
1.2.- Los fluidos no newtonianos. Ecuación de estado	61.-

	<u>Página</u>
1.3.- Aplicación de la ecuación de estado a casos particulares	65.-
1.4.- Diversos comportamientos de los fluidos no newtonianos. Comportamientos complejos . . .	68.-
1.4.1 - Comportamiento newtoniano	69.-
1.4.2 - Comportamiento pseudoplástico	72.-
1.4.3 - Comportamiento dilatante	75.-
1.4.4 - Comportamiento plástico	77.-
1.4.5 - Comportamiento tixotrópico	78.-
1.4.6 - Comportamiento reopéctico	81.-
1.4.7 - Comportamientos mixtos	83.-
1.5.- Modelos matemáticos de los fluidos puramente viscosos de carácter pseudoplástico	85.-
1.5.1 - Modelos teóricos	86.-
1.5.2 - Modelos experimentales	90.-
1.5.2.1-Ley de potencias o de OSTWALD	90.-
1.5.2.2-Modelo de ELLIS y derivados	93.-
1.5.2.3-Modelo de REYNER	95.-
1.5.2.4-Modelo de BINGHAM y análogos	96.-
1.6.- Ajuste de las funciones reológicas	97.-
1.6.1 - Método de los mínimos cuadrados. - Aplicación	100.-
1.6.2 - Resultados obtenidos	103.-
NOMENGLATURA	108.-
BIBLIOGRAFIA	111.-

CAPITULO II

TECNICAS DE CARACTERIZACION DE LOS FLUIDOS NO-NEWTONIANOS. INSTRUMENTACION.

2.1.- Introducción	115.-
2.2.- Viscosímetros capilares	120.-

	<u>Página</u>
2.2.1 - Introducción	120.-
2.2.2 - Derrame capilar	121.-
2.2.3 - Errores por incumplimiento de las hi pótesis	123.-
2.3.- Reoviscosímetros rotacionales	126.-
2.3.1 - Introducción	126.-
2.3.2 - De cilindros coaxiales	128.-
2.3.3 - Errores por incumplimiento de las hi pótesis	131.-
2.3.4 - De cono-plato	134.-
2.3.5 - Errores por incumplimiento de las hi pótesis	135.-
2.4.- Otros viscosímetros y reoviscosímetros	138.-
2.4.1 - De placas deslizantes	138.-
2.4.2 - De flujo radial	139.-
2.4.3 - De flujo axial no capilar y flujo mixto	139.-
2.4.4 - Rotacionales	140.-
2.5.- Resumen de las características de algunos viscosímetros y reómetros comerciales	141.-
2.5.1 - Introducción	141.-
2.5.2 - Viscosímetros de flujo axial	142.-
2.5.3 - Rotacionales	143.-
2.5.4 - Otros	147.-
2.5.5 - Campo de aplicación y sinopsis de ca racterísticas	152.-
2.6.- Estudio del reoviscosímetro FERRANTI	159.-
2.6.1 - Introducción	159.-
2.6.2 - Calidad del termostataado y efectos de cambio de escala	162.-

	<u>Página</u>
2.6.3 - Bucles que se presentan en los regu- gramas y recorrido de los mismos .	172.-
2.6.4 - Efectos de la distancia cono-plato	181.-
2.6.5 - Efectos de inercia y otros, picos, centrifugado	184.-
2.6.6 - Conclusión	194.-
NOMENCLATURA	195.-
BIBLIOGRAFIA	197.-

CAPITULO III

CARACTERIZACION DE FLUIDOS SEUDOPLASTICOS

3.1.- Introducción	209.-
3.2.- Criterios de viscosidad	210.-
3.3.- Aplicación a los fluidos pseudoplásticos .	214.-
3.4.- Estudio experimental	218.-
3.4.1 - Planteamiento del estudio	218.-
3.4.2 - Observaciones sobre el comporta- miento	220.-
3.4.3 - Síntesis de la caracterización . .	231.-
3.4.4 - Conclusiones	247.-
NOMENCLATURA	249.-
BIBLIOGRAFIA	250.-

CAPITULO IV

FLUJO EN MEDIOS POROSOS

4.1.- Ecuaciones generales del movimiento de un fluido. Ley de DARCY	253.-
4.1.1 - Límite de aplicación de la ley de DARCY	261.-

	<u>Página</u>
4.1.2 - Efectos moleculares	262.-
4.1.3 - Otros efectos	264.-
4.1.4 - Derrame de un fluido no-newtoniano	265.-
4.1.5 - Derrame para caudales elevados . .	266.-
4.1.6 - Distribución de presiones y de ve- locidades en el derrame a través un medio poroso	267.-
4.2.- Modelo industrial. Medio poroso	268.-
4.2.1 - Materiales	269.-
4.2.2 - Ejecución del modelo	274.-
4.2.3 - Caracterización del filtro. Derra- me de fluido newtoniano	282.-
4.2.3.1-Determinación de la porosi- dad	282.-
4.2.3.2-Determinación de la permea- bilidad	284.-
4.2.3.3-Determinación de las res- tantes características . .	288.-
4.3.- Derrame de fluidos no-newtonianos, de ca- rácter pseudoplástico a través de un medio poroso	292.-
4.3.1 - Descripción de los ensayos	292.-
4.3.2 - Resultados obtenidos	293.-
4.3.2.1-Visualización del comporta- miento pseudoplástico . . .	297.-
4.3.2.2-Análisis de la ley de DAR- CY generalizada	298.-
4.3.2.3-Análisis de la ley de DAR- CY simple. Viscosidad de - DARCY	334.-

PáginaAL CAPITULO IIANEJO II-A

TECNICAS DE CARACTERIZACION DE LOS FLUIDOS NO-NEWTONIANOS. INSTRUMENTACION.

II.A.1 - Introducción	400.-
II.A.2 - Características del Poliox	400.-
II.A.2.1-Generalidades	400.-
II.A.2.2-Preparación y química	401.-
II.A.2.3-Propiedades	403.-
II.A.2.4-Soluciones de Poliox	404.-
II.A.3 - Características del CMC	405.-
II.A.3.1-Generalidades	405.-
II.A.3.2-Preparación y química	405.-
II.A.3.3-Propiedades	407.-
II.A.3. -Soluciones de CMC	409.-

ANEJO II-B

EL VISCOSIMETRO CONO-PLATO FERRANTI

II.B.1.1-Descripción general	411.-
II.B.1.2-Unidad de medida	412.-
II.B.1.3-Unidad ampliadora	415.-
II.B.1.4-Unidad indicadora	415.-
II.B.1. -Unidad de control de la distancia cono- plato	417.-
II.B.1. -Accesorios y complementos	418.-

AL CAPITULO IIIANEJO III-A

CARACTERIZACION DE FLUIDOS SEUDOPLASTICOS

III.B.1 - Planteamiento del estudio. Programa uti- lizado	421.-
--	-------

AL CAPITULO IV

Página

ANEJO IV-A

FLUJO EN MEDIOS POROSOS

IV.A.1 - Flujo en conductos. Analogía capilar. Generalización de la ley de DANCY	425.-
IV.A.2 - Caracterización experimental del filtro	434.-
Listado del programa	439.-

ANEJO IV-B

IV.B.1 - Descripción del programa de cálculo . .	442.-
IV.B.2 - Precisión de los resultados empleados .	443.-
Listado del programa y organigrama correspondiente	445.-

AGRADECIMIENTO

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento a los miembros del Tribunal, por el honor que nos hacen al presidirlo. En particular, en esta ocasión, a D. VICTOR DE BUEN LOZANO, que puede ahora aquí ver el fruto de un trabajo que fue iniciado en su Cátedra de Mecánica de Fluidos, cuando, en 1971, tan amablemente nos permitió colaborar en ella.

Nos es agradable poder, desde aquí, expresar al Dr. LUIS VIRTO ALBERT Catedrático de Mecánica de Fluidos en la E.T.S.I.I.T., el reconocimiento por dirigir este trabajo y la admiración por sus cualidades personales y científicas. Sus consejos, su aliento, su crítica y su dedicación nos han permitido alcanzar esta meta y recordarle siempre unido a los conceptos de justicia y rigor científicos. De nuevo, gracias.

También nuestra gratitud al Profesor CLAUDE THIRRIOT, Laùreat de l'Institut, que con todo su equipo de investigación del E.N. S.E.E.H.I. de Toulouse, no escatimó en ningún momento su tiempo y su incondicional apoyo para iniciarnos y colaborar en este camino de la Reología.

Nuestro agradecimiento a todo el equipo de la Cátedra de Mecánica de Fluidos de la E.T.S.I.I.B., a la vez, compañeros y amigos. Ellos han aligerado la carga de las labores cotidianas, cuando más esfuerzo necesitábamos para sortear los numerosos obstáculos aparecidos.

También a MONTSE, aquí el fruto de su dedicación, y a nuestra familia para que vean que no han sido -

vanas las horas de ausencia.

Gratitud a la FUNDACION MARIA FRANCISCA DE ROU
VIRALTA que, a través de sus donaciones tanto hace por la
investigación. A ella debemos la Sección de Reología del
Laboratorio de Hidráulica, sin la cual no hubiera sido pos
sible este trabajo.

A MARTIN, PESQUEIRA, Ma TERESA, MAMEN, BELLET,
RIBOT, en fin, a todos aquellos que, de una u otra forma,
han participado en la presentación de este trabajo.

Barcelona, Enero de 1976.

I N T R O D U C C I O N



INTRODUCCION

El estudio y, más concretamente, el empleo de los fluidos por el hombre se pierde en los albores de la Historia, tomando, la disciplina que los trata, a principios de este siglo el nombre de Mecánica de Fluidos.

No vamos a citar exhaustivamente a todos aquellos que aportaron su saber a esta ciencia y que, encabezados por Arquímedes, se presentan en las obras especializadas. Sólo nos referiremos a los que de una forma directa se encuentran relacionados con este trabajo, relación que tiene mucho de sentimental y que, a modo de árbol genealógico, nos enlaza con ellos y nos produce esa humilde inquietud de no llegar a ser dignos de nuestros predecesores.

Nos merece especial veneración LEONARDO DE VINCI (1452-1519) que, en su obra "Del moto e misura dell'acqua", sienta el principio del empirismo en lo concerniente al estudio de los fluidos reales diciendo: "-cuando tratéis del movimiento del agua no olvidéis acudir a experimentación, luego a la razón-".

Sucesivas aportaciones vamos encontrando, todas ellas basadas en la observación del movimiento relativo sólido-fluido. NEWTON (1692-1728), luego de estudiar el amortiguamiento de las oscilaciones de péndulos en el seno de líquidos, pone en evidencia, en sus "Principios matemáticos de filosofía natural", la resistencia fluida

o viscosa. Queda aquí definida la linealidad entre esfuerzos aplicados y gradientes de velocidades de deformación, de igual manera que ROBERT HOOKE (1635-1703) plantea la elasticidad lineal.

Fue un médico, JEAN LOUIS POISEUILLE (1799-1869), quien, estudiando el movimiento de la sangre, fluido no-newtoniano, en los capilares, definió el derrame laminar al igual que lo hizo LUDWING HAGEN (1797-1884).

La aparición del soporte matemático de la dinámica de los fluidos se debe a NAVIER (1785-1836), plasmado en su obra "Memoria sobre las leyes del movimiento de los fluidos". Las ecuaciones de NAVIER se completan con la aportación del término de viscosidad por GEORGE STOKES (1819-1930), definiendo el fluido de su nombre e investigando la resistencia al movimiento de una esfera en el seno de un fluido. Aportaciones y trabajos en el mismo sentido hacen MARGULES y POISSON.

Es contemporáneo de los anteriores DARCY (1803-1858), que plantea la ley de su nombre en la obra "Les fontaines publiques de la ville de Dijon". Su expresión es tan fundamental en el derrame de fluidos a través de medios porosos que a la unidad de permeabilidad se le denomina "darcy".

OSBORNE REYNOLDS (1842-1912) definitivamente determina el régimen laminar, de tanto interés en el derrame de los fluidos. Para ello emplea el número de su nombre, número adimensional que se apoya en el Análisis

Dimensional aportado por BUCKINGHAM (1867-1940), tan empleado éste en los trabajos de experimentación y cálculo en los fluidos reales.

A principios del siglo actual se profundiza en el estudio del movimiento de los fluidos con las aportaciones de von KARMAN (1881-1963), LUDWIG PRANDTL (1875-1953), PAUL R.H. BLASIUS, HERMAN SCHLICHTING, JOHANN NIKURADSE, A.G. EIFFEL (1832-1923), entre otros.

Es en esta época cuando se desarrollan los primeros estudios de materiales; primero, motivados por la aplicación de pinturas y el control de calidad de alimentos por técnicas sencillas; posteriormente, la búsqueda de materiales resistentes a acciones mecánicas, electro-magnéticas, químicas, térmicas y a las radiaciones (metales y plásticos reforzados, vidrio tensado, poliolefinas) y, en la actualidad, aparecen los problemas tecnológicos y de recursos de investigación específicos (fibras sintéticas, tintas, lubricantes, respuestas psicológicas, hemología y hematología).

La elasticidad lineal es insuficiente cuando las condiciones de trabajo se acercan a las de rotura. La ley de NEWTON es una aproximación de ciertos comportamientos fluidos que no sirven para muchos de ellos, ni para el agua en condiciones extremas, y además se presentan fuertes correlaciones entre composición, color, sabor y aspecto general de un producto con su comportamiento al flujo. Es necesario descender al nivel molecular para explicar estos comportamientos.

Entre 1920-1930 aparece la primera generación de reólogos. Se agrupan ingenieros y científicos al rededor de BINGHAM, SCOOT-BLAIR, PHILLIPOFF y REINER, dando las bases de esta nueva ciencia, al abandonar los conceptos de la Física de los fluídos y sólidos empleados anteriormente. A ellos se les llama padres de la Reología, ciencia de la deformación y del flujo ($\rho\epsilon\omicron\ \lambda\omicron\gamma\omicron\varsigma$), paternidad en cierto modo compartida con HERACLITO que, a.J.C., indicó que "todo fluye" ($\eta\alpha\delta\epsilon\tau\alpha\ \rho\epsilon\iota$). Se estableció entonces un puente entre el sólido rígido de EUCLIDES y el líquido perfecto de PASCAL, quedando definidas las fronteras de la Reología en función de los límites a adoptar para caracterizar un comportamiento. También en esta época trabajan OSTWALD, BARNES, de WAELE, NUTTING y HATSCHEK, normalmente sobre soluciones coloidales.

En 1945 empiezan los estudios teóricos con la 2ª generación de reólogos físico-matemáticos, apareciendo los modelos ideales que vienen a sustituir al elástico lineal y viscoso puro, aunque aún no se introduzca la fatiga y el envejecimiento. Hasta 1960 no hace su aparición la Bioreología.

Se observa que el comportamiento de un cuerpo depende de la naturaleza intrínseca del material, de sus propiedades físico-químicas, de los criterios de sollicitación mecánica, de la temperatura y de la escala de tiempos.

De esta complejidad de comportamiento nacen las diversas líneas de trabajo técnico científicas : reológica pura, físico matemática, físico química, reométrica, sicoreológica, bioreológica aplicadas, que se pueden agrupar en la físicoquímica, la teórica y la ingeniería.

La línea físico química se polariza en la de terminación cualitativa y cuantitativa de las deformaciones de los cuerpos reales bajo acciones de naturaleza diversa y en condiciones experimentales definidas. Clasifica al material por su carácter dominante en condiciones dadas y pretende una predicción de comportamiento bajo condiciones diferentes.

La línea teórica, como segregación de la Mecánica Racional, de la Física del estado sólido y líquido y de la Termodinámica establece la teoría matemática no lineal del medio continuo. Ha de combinar la elasticidad, la hidrodinámica, la microestructura del material y las relaciones esfuerzos-deformaciones-temperatura-tiempo del medio continuo.

Por otra parte, la ingeniería encuentra grandes dificultades de comunicación con las anteriores, entre las cuales se establecen pocos intercambios. Al ingeniero le cuesta asimilar y sobre todo utilizar los conceptos de Reología, pues no existe ningún material que cumpla las hipótesis en las que se apoyan los modelos teóricos. Ningún modelo se cumple y las experiencias no son lo suficientemente completas y profundas para generalizarlas.

Los aspectos a considerar son numerosísimos, y muchos de ellos despreciables desde el punto de vista del ingeniero, acostumbrado a los fluidos newtonianos - con su viscosidad y densidad. Normalmente se postula un modelo y se calcula el esfuerzo necesario para mantener el flujo, y viceversa. Esto ya es difícil en newtonianos y prácticamente imposible en materiales complejos. En realidad sólo se puede plantear con rigor el régimen laminar, quizás sea ésta la hipótesis menos limitativa - pues, con estos materiales, es difícil alcanzar el régimen turbulento.

Esta problemática animó a los profesores Dr. L. VIRTO, de la E.T.S.I.I. de Tarrasa, y al Dr. C. THIRRIOT, del E.N.S.E.E.H.I. de Tolouse, a impulsar la realización de esta tesis.

El interés del Dr. VIRTO de iniciar la tecnología de los fluidos no-newtonianos en el seno de la Universidad Politécnica de Barcelona y el apoyo y colaboración del experimentado grupo de investigadores a cargo - del Dr. THIRRIOT, del Polytechnique de Tolouse, nos situó en condiciones de abordar este trabajo.

D. VICTOR DE BUEN, entonces Catedrático de Mecánica de Fluidos en la E.T.S.I.I.B., gentilmente apoyó el proyecto, invirtiendo parte de la donación de la FUNDACION MARIA FRANCISCA DE ROVIRALTA en la creación de la Sección de Reología del Laboratorio de Hidráulica, soporte material que ha permitido llevar adelante este estudio.

La creación de la Sección de Reología nos - obligó a efectuar un estudio de la instrumentación reométrica existente en el mercado. Se precisaba un equipamiento que cumpliera, entre otras, las condiciones de ser de común utilización y de realizar determinaciones con cierto nivel de calidad.

La citada Sección consta en estos momentos - de un equipo de reoviscosímetros de cilindro en medio infinito, de uso común en la industria, y de un reoviscosímetro cono-plato de grandes prestaciones, muy versátil. El equipo se completa con viscosímetros capilares y de - caída de bola, termostatos y demás auxiliares.

El inicio del trabajo tuvo lugar en el E.N. S.E.E.H.I.T., bajo la dirección del profesor THIRRIOT, - dada la experiencia que allí se tenía en este campo y la bibliografía e instrumentación disponibles.

Salvada esta etapa inicial, de puesta a punto, quedaba por determinar el objeto del trabajo de investigación. Continuando con la colaboración del E.N.S. E.E.H.I.T. y con la ayuda financiera de la Cátedra ESTEBAN TERRADAS se efectuó un sondeo industrial para poner de manifiesto las necesidades de la industria española. En el apéndice preliminar se expone el resumen de resultados de la encuesta, quedando, a partir de ella, definido el objetivo en la hidrodinámica de los fluídos no-newtonianos en los medios porosos, siendo el fluído de carácter pseudoplástico.

El trabajo precisaba concretarse a cierto comportamiento y siguiendo un modelo. En el capítulo I se exponen los diversos modelos de comportamiento fluidos posibles, el campo cubierto por los pseudoplásticos dentro de este espectro y se seleccionan el fluido base del estudio, como más representativo de los casos más frecuentes, y el modelo que mejor traduzca el carácter dominante del anterior. En este capítulo, es de destacar, el trabajo experimental, apartado 1.6, que nos ha permitido la relación del modelo de OSTWALD como representante del comportamiento pseudoplástico.

La selección de instrumentación, hecha con el fin de equipar la sala de reología, se presenta en el capítulo II. En él se da un resumen teórico práctico de la instrumentación existente y de los métodos de caracterización empleados. Se completa con una crítica del reoviscosímetro cono-plato, empleado para la caracterización, tratándolo como una cadena de medida.

La diversidad de magnitudes y facetas que intervienen en el comportamiento reológico de un fluido nos obligó a adoptar una sistemática para la utilización de los resultados de la caracterización. En el capítulo III se expone esta sistemática y se apuntan otras posibilidades que, a modo de estudio termodinámico, podrán definir el comportamiento del fluido en condiciones dadas.

Llegados a este punto, con el fluido y modelos seleccionados, la instrumentación contrastada y el fluido caracterizado, se puede iniciar el estudio hidrodinámico. El capítulo IV empieza con la caracterización

geométrica e hidrodinámica del medio poroso, realizada - ésta por la aplicación de la ley de DARCY y del modelo - capilar al flujo de dos fluidos newtonianos (agua y glicerina). A continuación, siguen las observaciones y estudio en el caso del flujo del fluido no-newtoniano.

Además del interés que encierra el estudio - del derrame en un medio complejo, como el poroso, por su generalidad respecto a cualquier otro, queremos destacar la relación directa con los casos industriales tales, como explotaciones petroleras (desplazamiento del petróleo, deficiencia de la recuperación, área afectada, modificación y nueva distribución de porosidad, recuperaciones secundarias, combustión "in situ", absorción de la roca, desplazamiento y equilibrio de la interfase, digitaciones, predicción de comportamientos en depósitos estratificados, productividad, homogeneización del flujo, es decir, transferencia de masa y de calor en geometría, condiciones y comportamientos diversos), aplicaciones también en la fabricación de fibras (por placa o lecho de arena), secado industrial, filtrado químico, reactores químicos con catalizador, columnas de rectificación y absorción, flujos lentos en medios subterráneos, procesos de polímeros, lubricación, diseño naval, etc. Este apuntado interés, es el que nos ha llevado al planteamiento de búsqueda de un modelo de flujo generalizado, basándose en un análisis científico de la fenomenología, y de un modelo de flujo simple y de aplicación industrial, planteamientos desarrollados en el capítulo IV.

Hemos presentado una exposición sistemática y detallada de todos los trabajos con la finalidad de definir las condiciones de realización, ensayo y medida y que, de esta manera, pueda conocer el lector la posible generalización del trabajo.

Algunas partes de los capítulos I, II y III podrían haberse tratado con más extensión, sólo se han - incluido los resúmenes que creemos permiten hacerse en - todo momento una composición de lugar, marcar de forma - simple y precisa el curso del trabajo y suministrar da- tos en forma sinóptica que puedan ser utilizados para - otros fines. Esperamos no haber restado claridad a la ex- posición.

El sistema de unidades empleado ha sido el - C.G.S., vigente en España. Se ha procurado seguir la no- menclatura recomendada por el Comité Español de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada. No se ha conse- guido totalmente este objetivo por exceso de variables, por lo que en cada capítulo se incluye una nomenclatura.

Las conclusiones se indican al final de cada capítulo y del trabajo. Aquí queremos destacar la que - consideramos más importante y que es el inicio de estu- dios de flujo de fluidos no-newtonianos en medios porosos deformables fibrilares, de filtración de suspensiones en fluidos pseudoplásticos y de estudio de características - reológicas en función de los pesos moleculares de los po límeros disueltos en agua, estudios que son continuación de éste o esclarecimiento de lagunas que en él se han - presentado y para los cuales se emplea la instrumentación

de la Sección de Reología de la
Fluidos.

Mecánica de -

Para finalizar queremos
ción de haber alcanzado buena parte
puestos y la ilusión y esperanza
investigación continúe y alcance
apetecidos.

de la satisfac
objetivos pro
la línea de in
dos y utilidad

P R E L I M I N A R

LOS FLUIDOS REOLOGICOS EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA

P R E L I M I N A R

LOS FLUIDOS REOLOGICOS EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA. PROBLE-
MATICA QUE PRESENTAN. SONDEO ESTADISTICO.

1. - INTRODUCCION

Con el fin de mejor orientar los trabajos de investigación en el campo de los fluidos no newtonianos se realizó en 1972 un sondeo sobre los productos de aspecto fluido o pastoso utilizados en la industria española y la problemática que presentaban.

Para tal sondeo se tomó como modelo es estudio realizado por el INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES - de Toulouse y concertado con la DELEGATION GENERALE A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, para el conocimiento de la problemática de los fluidos no newtonianos en el contexto industrial francés.

El impreso original francés, base de la encuesta, fue modificado buscando introducir una serie de controles que permitieran verificar la calidad de las respuestas y se complementó con otro, ambos se adjuntan, en el que se da una breve aunque práctica explicación sobre el concepto y las características cualitativas de los fluidos según su comportamiento en movimiento.

Encuesta sobre los productos industriales utilizados por las industrias españolas

Los diversos problemas que se presentan en los fluidos industriales (pastas, líquidos y gases) están estrechamente relacionados con su naturaleza REOLOGICA.

Es bien conocida la existencia de tales problemas en los campos de plásticos, pinturas, barnices, masillas, tintas, lubricantes, alimentación, papel, asfaltos, adhesivos, cosmética, farmacia, textil, cemento, cerámica, vidrio, metalurgia, minería, medicina, biología, etc., y la necesidad de una caracterización REOLOGICA para abordarlos y resolverlos.

La caracterización REOLOGICA de los fluidos nos llevaría a formar dos clasificaciones básicas:

1.ª clasificación

- FLUIDOS NEWTONIANOS, cuando hay proporcionalidad entre el esfuerzo de cizallamiento τ y el gradiente de velocidad de deformación du/dy , ley de Newton:
- FLUIDOS NO-NEWTONIANOS, cuando la citada proporcionalidad no es seguida por los fluidos. Básicamente encontramos dos grupos:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \mu = \text{coeficiente de proporcionalidad o viscosidad}$$

— De OSTWALD, la ley reológica es de la forma:

$$\tau = \mu' \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

Si $n > 1$ se les denomina fluidos dilatantes

Si $n < 1$ se les denomina fluidos pseudoplásticos

— De BINGHAM, la ley seguida es de la forma:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy}$$

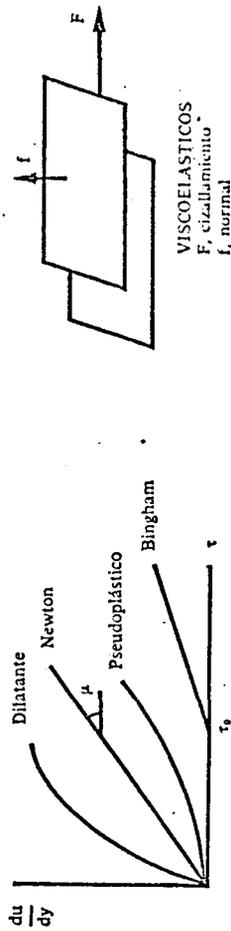
τ_0 = cizalladura de fluencia

2.ª clasificación

Si sometemos durante bastante tiempo el fluido a un gradiente de velocidades de deformación constante su viscosidad aparente puede presentar una de las evoluciones siguientes:

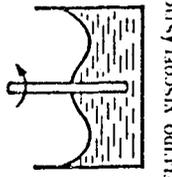
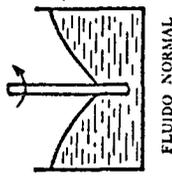
- se mantiene constante, independiente del tiempo
- decrece con el tiempo, fluido TIXOTROPICO
- crece con el tiempo, fluido REOPECTICO

Dentro de este grupo de fluidos de característica independiente del tiempo encontramos los VISCOELASTICOS formados por un componente elástico y otro viscoso. La presencia del componente elástico hace aparecer una componente normal al plano de cizallamiento durante la deformación.



Si un fluido pertenece marcadamente a una de las anteriores clasificaciones será fácil distinguirlo con los ensayos siguientes.

Disponer el fluido en un recipiente en el seno del cual se hará girar una varilla (ver figura). En la figura se aprecia el perfil que presentará la superficie del fluido según las características REOLOGICAS.

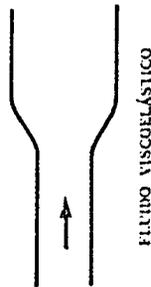


Si al hacer girar la varilla cada vez el giro se hace más difícil, la viscosidad aparente del fluido aumenta y presentará reopexia; si por el contrario, esta resistencia disminuye, la viscosidad aparente también, será un fluido tixotrópico.

Los fluidos anteriores vuelven a mostrar su característica viscosa inicial una vez han permanecido un cierto tiempo en reposo después de realizar el ensayo anterior.

El mismo ensayo a velocidad de giro de la varilla variable nos orientará nuevamente; si al crecer la velocidad crece la viscosidad, el fluido es dilatante; si la viscosidad decrece con la velocidad, será pseudoplástico.

Otro tipo de ensayo sería el siguiente: hacer salir el fluido por un tubo lo más estrecho posible (tubo de pasa dentífrica de sección estrecha). Si para empezar a fluir se necesita un esfuerzo inicial será un fluido de Bingham. Los dibujos nos indican el perfil del chorro de salida para un fluido normal y un viscoelástico.



El conjunto del cuestionario que se adjunta está destinado a clasificar los diferentes fluidos empleados en la industria. El conocimiento de su comportamiento, características REOLOGICAS, debe de permitir un tratamiento más eficaz y económico de los problemas industriales que se presentan.

Próximamente se pondrá en marcha la sección de REOLOGIA, dentro del Departamento de Física Teórica y Aplicada de la Universidad Politécnica de Barcelona; el captar la problemática industrial de manipulación de fluidos, el saber las posibilidades de los departamentos de control e investigación, etc., es primordial para que este departamento pueda colaborar con la industria.

Con estos fines, le rogamos cumplimentar el cuestionario lo más completamente posible. Coloque una cruz en la casilla conveniente, esto será suficiente para responder a la mayoría de preguntas. Solicite un ejemplar de cuestionario para cada fluido que trate. El apartado «OBSERVACIONES» le permitirá desarrollar las respuestas y dar las indicaciones que considere pertinentes.

Esta encuesta es totalmente confidencial.

Remitir la encuesta y cualquier consulta a:

LABORATORIO DE HIDRAULICA
E.T.S.I.B.

AVENIDA GENERALÍSIMO FRANCO, 999

BARCELONA - 14

NOMBRE DE LA EMPRESA (facultativo)

DIRECCION (facultativo)

I. Su empresa está situada a una distancia de Barcelona de

- menos de 100 Km.
entre 100 y 500 Km.
entre 500 y 1000 Km.
más de 1000 Km.

Provincia:

II. Es una:

- empresa de fabricación
laboratorio universitario
laboratorio industrial
empresa de tratamientos
laboratorio de la Administración
Otros (Especificar)

III. La naturaleza de su empresa le permite encuadrarse en la categoría de:

- Química
Alimentación
Metalurgia
Farmacéutica
Textil
Petróleo
Pasta de papel
Materias plásticas
Mecánica de Fluidos
Producción de energía
Perfumaría
Investigación (Rama)
Otras (Espec. tipo)

IV. El número de los empleados en su empresa es:

- Menor de 50
De 100 a 500
De 50 a 100
Más de 500

CUESTIONARIO

I. Emplean Uds.:

- un fluido
una dilución
una suspensión

1.1.A ¿Lo fabrica?

- fluido
dilución
suspensión

1.1.B ¿Lo vehicula?

- fluido
dilución
suspensión

1.2 El empleo de éste en su actividad es:

- fluido
dilución
suspensión

1.3 El nombre de la sustancia es:

- fluido
dilución
suspensión

1.4 La sustancia es:

- GAS
LIQUIDO
PASTA
HOMOGENEO
HETEROGENEO

1.5 Si el fluido es una suspensión

- en agua
en otro fluido
en el aire
sólido
líquido
gas
pastoso

2. Conocimiento de propiedades:

- ¿Conocen Uds. las propiedades físico-químicas del fluido?
El conocimiento de ellas sería para Uds. de gran interés
Interés secundario
Interés medio

3. Caracterización:

- La viscosidad a la temperatura de utilización de °C es: inferior a 1 centipoise entre 1 y 20 centipoises superior a 20 centipoises
¿La han medido Uds.?
Si. Si: ¿Han encontrado variaciones del valor obtenido según el método operatorio?
¿Conocen Uds. el valor de la viscosidad en función del gradiente de velocidades?
Esta función es: Creciente Decreciente Monótona

4. Clasificación:

- ¿Conocen Uds. la noción de fluido no-newtoniano?
¿Su fluido puede considerarse como no-newtoniano?
SE IGNORA
¿En qué categoría lo clasificaría?
Presenta: OSTWALD BINGHAM PSEUDO-PLASTICO
DILATANTE VISCOELASTICO

4.4 ¿Varían sus características con el tiempo?

- Tixotropia
Reopexia

5. Problemática:

- La sustancia presenta problemas de: Derrame Bombo Otros (cuáles?)
Cuando se pone en movimiento, la viscosidad aparente Aumenta Disminuye Variación que se ignora
¿Cuando vuelve a reposo el fluido, vuelve a la viscosidad inicial?
¿Se produce una degradación (envejecimiento) del fluido con el tiempo?

6. Condiciones térmicas:

- La temperatura de utilización del fluido es: inferior a 0°C entre 0° y 30°C superior a 100°C

0 1 2 3 4 5
0 1 2 3 4 5
0 1 2 3 4 5

0 1 2
0 1 2 3
0 1 2 3 4
0 1 2 3 4

0 1 2
0 1 2 3

0 1 2 3
0 1 2

0 1 2
0 1 2

0 1 2
0 1 2 3

0 1 2

0 1 2 3

0 1 2 3
4 5

0 1 2
0 1 2
0 1 2

0 1 2 3

0 1 2
3 4

0 1 2 3

0 1 2 3

0 1 2 3
3 4

Observaciones y apreciaciones sobre el proceso y el fluido y otras sugerencias.

6.2 ¿Durante la preparación <input type="checkbox"/> tratado <input type="checkbox"/> utilización <input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>	0 1 2 3
es cuando el fluido sufre la aportación térmica?	0 1 2
6.3 Se calienta <input type="checkbox"/> enfría <input type="checkbox"/>	0 1 2
en circulación <input type="checkbox"/> o en reposo <input type="checkbox"/>	0 1 2
6.4 La transmisión térmica es por:	
Convección	0 1 2
Mézcala	0 1 2
6.5 La convección es: Natural <input type="checkbox"/> Forzada <input type="checkbox"/>	0 1 2
7. Misión del fluido:	
7.1 ¿Es un transportador de calor?	0 1 2
7.2 ¿Aporta calorías? <input type="checkbox"/> ¿las evacúa? <input type="checkbox"/>	0 1 2
8. Características térmicas:	
8.1 ¿Conocen Uds. el valor de la conductividad térmica?	0 1 2
8.2 ¿La han medido Uds.?	0 1 2
8.3 ¿Varía con la temperatura?	0 1 2
9. Posibilidades de estudio:	
9.1 ¿Desearían estudiar este fluido?	0 1 2
9.2 Otro fluido. ¿Cual?	0 1 2
10. Consulta:	
10.1 ¿Responderían a otro cuestionario sobre otros fluidos?	0 1 2
Número de cuestionarios deseados <input type="checkbox"/>	
10.2 ¿Desearían recibir la visita de uno de nuestros ingenieros para ampliar información?	
SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>	0 1 2
11. Laboratorio:	
11.1 ¿Su laboratorio está equipado con instrumentos de viscosimetría?	0 1 2
11.2 ¿De que tipo?	
Convencional (Ostwald, Engler...)	0 1
Capilar	0 1
Hoppler (caída de bola)	0 1
Evansión	0 1
Cono-plato	0 1
Cilindros coaxiales	0 1
Cilindro en medio infinito	0 1
Otros SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>	0 1 2
Especificar otros instrumentos	
12. Recepción de resultados:	
¿Le gustaría recibir el resultado de esta encuesta?	0 1 2
SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>	

Dirección para envío:

El carácter confidencial de ambas encuestas, tanto la del I.M.F, como la de la E.T.S.I.I.B., ha impedido que la cooperación llegara a un intercambio y comparación de resultados entre ambos países y que se realizara una exposición más detallada de los resultados.

2. - EMPRESAS ENCUESTADAS

Se remitió la encuesta a mil quinientas empresas españolas seleccionadas del "Directorio de las empresas químicas españolas de cierta importancia" y de las guías telefónicas, secciones comerciales, de Madrid, Barcelona, Valencia, Vizcaya y Sevilla.

Se seleccionaron las empresas químicas de alimentación, laboratorios de investigación, metalúrgicas, petróleos, colas, ceras, resinas, vidrio, papel, cosmética, esencias, perfumes, lubricantes, aceites, adhesivos, barnices, pinturas, betumes, tintas, plásticos, caucho, fibras y otras, y de tal forma que no se consultaran delegaciones de las casas centrales o empresas comerciales.

3. - DESCRIPCION DE LOS IMPRESOS

3.1. - IMPRESO INFORMATIVO

En este impreso se hace una breve introducción a las sustancias posiblemente afectadas, pasando se seguidamente a clasificar los fluidos en :

- A) - de carácter viscoso independiente del tiempo. Modelos de NEWTON, OSTWALD, BINGHAM.
- B) - de carácter viscoso dependiente del tiempo. Comportamiento reopéctico y tixotrópico.
- C) - de carácter complejo viscoelástico.

Seguidamente se indican los métodos cualitativos de agitación y flujo en una boquilla, ambos frecuentes en la industria y de fácil realización, que permiten clasificar la sustancia estudiada en uno de los anteriores grupos.

Para finalizar, en el impreso, se explican los motivos de la encuesta, la forma de cumplimentarla y su carácter confidencial.

3.2. - IMPRESO BASE DE LA ENCUESTA

En él se observa la codificación en el margen derecho para realizar el tratamiento de las contesta

ciones por ordenador y que, dado el bajo porcentaje de - respuestas, no ha sido necesario.

El impreso consta de siete apartados :

- Encabezamiento. Nombre y dirección de la empresa.
- I. Situación de la empresa.
- II. Tipo de fábrica o planta.
- III. Clasificación de la empresa según el sector de actividad.
- IV. Tamaño de la empresa.
- Cuestionario.
- Observaciones y sugerencias.

Los apartados I, II, III y IV permiten obtener datos generales de interés sobre la empresa.

El cuestionario se divide en doce apartados referentes al fluido, al proceso y al interés de su estudio, que son los siguientes :

1. - Generalidades sobre la sustancia empleada.
2. - Conocimiento y propiedades de la sustancia.
3. - Propiedades de tipo viscoso del fluido y su determinación.
4. - Clasificación reológica de la sustancia.
5. - Problemática que presenta el fluido.
6. - Condiciones y funciones térmicas del fluido durante el proceso.

7. - Misión del fluido.
8. - Características térmicas del fluido.
9. - Interés del estudio del fluido.
10. - Realización y ampliación de la consulta.
11. - Existencia de un laboratorio reométrico en la industria y su equipación.
12. - Recepción de resultados.

4. - COMENTARIOS AL CUESTIONARIO

4.1. - FINALIDADES

A continuación se expone la finalidad de cada uno de los apartados del cuestionario.

1. - Generalidades sobre la sustancia o fluido empleados.

Se pretende obtener una visión conjunta de los fluidos empleados y objeto de la encuesta, considerando: su aspecto físico (puro, dilución, suspensión), si es fabricado o si sólo interviene en el proceso, su empleo (primordial, medio, secundario), su denominación y origen (comercial, químico), su aspecto externo (gas, parta, líquido, homogéneo, heterogéneo) y las fases que están presentes en caso de dilución, emulsión, suspensión.

2. - Conocimiento y propiedades del fluido.

En cierta manera está relacionado con el interés del fluido en el proceso y, de existir este interés, - con el nivel tecnológico, control de calidad y control de producción existentes y aplicados.

3. - Propiedades de tipo viscoso del fluido y su determi
nación.

Se pregunta sobre la característica viscosa del flui
do a la temperatura de utilización, sobre la calidad de esta medida y sobre su variabilidad según el gra
diente de velocidades.

Como se puede observar hasta el momento, y se repetirá en posteriores preguntas, hay un carácter reiterativo en ellas, que sirve para el establecimiento de los controles sobre la fiabilidad de las respuestas.

4. - Clasificación reológica de los fluidos.

Se desea saber los diversos comportamientos fluidos y, basándose en este conocimiento o en el aportado en el impreso informativo, se solicita una clasificación de los fluidos en los grupos típicos reológi
cos que se indican en 3.1.

5. - Problemática que presenta el fluido.

La problemática del fluido en proceso (agitación, - circulación, bombeo, desgasificación, emulsionado, gelificación, etc.) está íntimamente relacionada con sus características reológicas al flujo y con la es
tabilidad de éstas en el tiempo.

6. - Condiciones térmicas.

Información sobre las dificultades de control del fluido, requerimientos especiales en laboratorio, estabilidad de la sustancia, estado o aspecto posible a temperatura ambiente, transmisión de calor y forma de realizarlo.

7. - Misión del fluido.

Sólo interesa su aspecto de caloportador dada la influencia de la temperatura en el comportamiento hidrodinámico.

8. - Características térmicas del fluido.

Nos relaciona el interés del fluido como caloportador y el nivel tecnológico en el conocimiento de esta transmisión de calor.

9. - Interés de un estudio del fluido.

Inquietud por mejorar u optimizar el proceso conociendo las características del fluido en el caso que presente interés.

10.- Realización y ampliación de consulta.

Se trata de saber cuantos fluidos presentan este interés y de establecer la disposición adecuada para iniciar un contacto que permita definir claramente esta problemática y las posibilidades de cooperación.

11.- Existencia de un laboratorio reológico reométrico - en la industria y su equipación.

En caso afirmativo, la especificación de los equipos existentes en el laboratorio informa sobre su idoneidad para el fluido o fluidos que se encuestan, - posibilidad de hacer estudios cuantitativos o solamente cualitativos, capacidad investigadora y de - control del laboratorio.

12.- Recepción de resultados.

Se constituye como indicador del interés sobre el - tema.

El apartado apreciaciones y sugerencias permite ampliar la información y comentar todos los aspectos que se consideren susceptibles de ser tratados.

4.2. - CONTROLES

La deficiente información sobre el tema, la dependencia tecnológica, la falta de recursos, el desconocimiento del proceso, de la tecnología y de otros muchos factores hacen que al cumplimentarse el cuestionario anteriormente comentado se obtengan respuestas en desacuerdo con la realidad. Para evitar este hecho y poder - evidenciarlo se han previsto en él reiteraciones que ponen al descubierto algunos de estos posibles errores. Vea mos cuales son estas reiteraciones.

El apartado primero del cuestionario describe de forma general el fluido, clasificándolo en fluido puro, dilución o suspensión. Este carácter físico debe estar de acuerdo con el nombre comercial o químico de la sustancia (apartado 1.3 del cuestionario), así como con su aspecto (apartado 1.4), con su composición (apartado 1.5) y con su comportamiento (apartado 3, 4 y 5).

El conocimiento de sus propiedades ha de ser congruente con el interés de la sustancia (apartado 1,2), con las posibilidades del laboratorio (apartado 11) y con su necesidad.

Sabidas ya las anteriores peculiaridades del fluido y definido por su nombre, se infiere su viscosidad aparente posible (apartado 3.1) y se pide el nivel de conocimiento de esta viscosidad (apartados 3.3, 3.4 y 3.5) que ha de contrastarse con las respuestas del apartado 4 y 5. Nótese que el apartado 3 responde al ensayo de laboratorio, el 4 a ensayo de laboratorio o apreciación general y el 5 a comportamiento en proceso. Los tres han de ser congruentes, de lo contrario se observaría falta de rigor en los ensayos de laboratorio y desajuste entre las condiciones del ensayo y las del proceso, lo que para fluido no newtonianos no puede permitirse si se da el caso de intervención del gradiente de velocidades en aquel último.

Las condiciones térmicas, junto con el carácter del fluido y su conocimiento específico, nos informan sobre la estabilidad de éste y su posible degradación, cambio de fase, condiciones generales del proceso

y compatibilidad con los datos expresados del fluido. - Asimismo, se relacionan con el apartado 6, 7 y 8 y nos permiten determinar la función de los fluidos no newtonianos en la industria como caloportador.

Finalmente, la existencia y composición del laboratorio industrial nos asegura la calidad de las determinaciones y de los datos expresados en todo el cuestionario (apartados 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8), así como la adecuación de aquél y su capacidad para estudiar los fluidos y los procesos y para realizar los controles pertinentes.

5. - REALIZACION DEL SONDEO

El sondeo industrial se realizó en tres etapas. En la primera se puso a prueba el esquema general del cuestionario para comprobar los aspectos siguientes.

- Comprensión por parte del encuestado.
- Alcance de los objetivos indicados de definición del fluido, del proceso, de la problemática, y de los medios de laboratorio a través del cuestionario.
- Funcionamiento de los controles.
- Funcionamiento de la comunicación con el encuestado a todos los niveles.
- Fiabilidad de las conclusiones del cuestionario.

La forma de realizar estas verificaciones - consistió en consultar a las industrias que ofrecían un grado tecnológico elevado y una problemática ya conocida, o que, en todo caso, posteriormente se pudiera conocer.

Se remitió la encuesta a estas empresas. Recibida la contestación, se comentaba con los encuestados con el fin de verificar si se habían logrado los objetivos propuestos.

Este primer sondeo permitió introducir ciertas modificaciones de interés en las preguntas.

El cuestionario definitivo se hizo llegar, en la segunda etapa, a 1.500 empresas, seleccionadas como - anteriormente se ha citado.

De los cuestionarios remitidos, el 99% llegó a su destino, siendo contestados el 3% de ellos.

Para finalizar, se entró en contacto con las empresas que lo requirieron para profundizar sus problemas concretos.

El número real de encuestas contestadas fue superior al 3%, pues varios de los encuestados solicitaron más impresos para cubrir toda la gama de fluidos por ellos empleados.

6. - RESULTADOS

6.1. - RESULTADOS PORCENTUALES

Resumimos los resultados porcentuales según las respuestas al cuestionario.

Empresas que indican su nombre	86%
Empresas que indican su dirección	83%

Las empresas se encuentran situadas a :

Menos de 100 km.	62%
Entre 100 y 500 km.	24%
Entre 500 y 1000 km.	7%
Más de 1000 km.	7%

El 24% de la totalidad se encuentran en la provincia de Barcelona.

La empresa se autodefine como :

De fabricación.	83%
Laboratorio industrial.	10%
De tratamiento	7%

y se encuadra en el grupo de :

químicas	45%
alimenticioas	6%
farmacéuticas	6%
petróleo	3%

pasta y papel	6%
materias plásticas	6%
mecánica de fluidos	3%
perfumería	3%
detergentes	3%
otras	3%

Su número de empleados es de :

Menos de 50.	17%
de 50 a 100	4%
de 100 a 500	59%
más de 500	20%

La empresa emplea en sus operaciones :

un fluido	36%
una dilución	24%
una suspensión	27%

siendo estas sustancias fabricadas en el 70 % de los casos por igual para los fluidos, diluciones y suspensiones.

La sustancia se vehícula en el 93% de las veces que se emplea, siendo la frecuencia el doble en el caso de un fluido que en el de la dilución y de la suspensión.

El uso de la sustancia objeto de la encuesta es de un interés :

primordial	87%
medio	10%
secundario	3%

y tiene denominaciones comerciales o químicas indistintamente tratándose de :

un gas	8%
una pasta	48%
un líquido	44%

de aspecto :

homogéneo	55%
heterogéneo	45%

En el caso de suspensiones y diluciones, es el resultado de un preparado con :

agua	56%
otro fluido	44%

Las propiedades fisicoquímicas de la sustancia se conocen en el 58% de los casos y se consideran :

de gran interés	72 %
de interés secundario	10 %
de interés medio	18 %

La viscosidad a la temperatura de utilización es superior a 20 cp. en el 61% de los fluidos, midiéndola el industrial en el 66% de ellos, de los cuales se sabe que presentan variación según el método operatorio el 75% de los casos, del 25% de estos se conoce la variación de la viscosidad con el gradiente de velocidades, siendo el 63% de las veces pseudoplástico su comportamiento.

Llegados a este punto, queremos resaltar que las encuestas contestadas respondieron en su mayoría a la existencia de una problemática en el comportamiento del fluido, muchas veces enmarcada detrás de una falta de normalización en el método operatorio para caracterizar la sustancia.

El 88% de las respuestas demostraban ignorar la noción de fluido no newtoniano y consideraban emplear fluidos de este tipo el 74% de ellos. Parece ser que la tixotropía es frecuente en el 75% de las variaciones temporales de las características.

La problemática presentada es diversa y se reparte en problemas de bombeo, derrame o flujo (el 50%), control, aplicación, filtración, manipulación, retención de aire, variación de densidad, etc.

Hay que hacer notar que estas cuestiones pueden reducirse a : bombeo, flujo y aplicación, en cuanto al carácter reológico de los fluidos no newtonianos en movimiento.

El fluido se utiliza a temperaturas relativamente bajas, entre 0 y 30°C, en el 58% de los casos. Si actúa como caloportador, se calienta en circulación por convección forzada, aportando calorías al proceso el 75% de las veces. Se desconoce normalmente la conductividad térmica del fluido (en el 80%) y, de conocerse, sólo el 10% de las veces la conductividad es medida por el interesado.

El equipo instrumental de los laboratorios es de viscosimetría convencional (copas Ford y otras, capilares convencionales tipo Englerd, Redwood y otros) y también es frecuente el viscosímetro de cilindros en medio infinito y variantes de éste, siendo caso inexistentes los reómetros a extrusión cono-plato y cilindros coaxiales.

el 33% de las contestaciones amplían su información sobre la sustancia, el proceso o el problema en concreto que se les presenta.

6.2. - LOS FLUIDOS CON PROBLEMATICA

Los fluidos o sustancias reflejadas en la encuesta, y que presentan problemática reológica a causa de su comportamiento en flujo son :

- melazas de remolacha, líquidos fisiológicos, almidón, gelificados, miel, cacao, lectina, zumos de frutas, - plastisoles, pinturas, cloruro de polivinilo, aceites vegetales, derivados del petróleo, pigmentos dispersos, masas y salsas de estucado, celulosa en pasta de papel, barnices y tintes.

En líneas generales son compuestos poliméricos, emulsiones, diluciones de polímeros, suspensiones de partículas, esferoidales o fibrilares, y líquidos espesos de origen orgánico.

Otros fluidos como el agua, aguas residuales, urbanas, oxígeno, metanol, nítrico, epiclorhidrina, ácidos orgánicos varios, sosa cáustica, polietileno, dodec**il** bencensulfato sódico y otros presentan en la industria - problemas de otro orden y de menor interés para nuestro estudio.

6.3. - CONCLUSIONES GENERALES

La correlación entre las respuestas obtenidas son : tipo de industria - problemática reológica

La industria química tiene problemas de control y de aplicación.

Los fabricantes de pintura, de aplicación.

Las fábricas de papel, pasta de papel y alimenticias tienen problemas de aplicación y de filtrado.

Consideramos que muchos de estos problemas - se deben a deficiencias en el proceso y falta de control en este (malas diluciones y preparación), siendo independientes del carácter no newtoniano del fluido o de la - sustancia.

En general todas las empresas tienen problemas en el campo del bombeo y de derrame.

Viscosidad aparente del fluido-problemática

La gran mayoría de los fluidos que presentan problemas reológicos tienen una viscosidad mayor de 20 - cp. Es inferior a este valor en el 26% de los casos y - los problemas que presentan no son de gran importancia.

Existencia de un laboratorio-problemática

Sólo alguna de las empresas, con un número - de empleados superior a cien, tiene equipos de reometría capaces para realizar estudios cuantitativos. Se observa cierto equipamiento de los laboratorios con modelos reducidos del proceso de fabricación que presenta interés para alguna tecnología concreta (amasadores, máquinas de - extrusión). En general, la instrumentación es insuficiente, inadecuada y mas empleada.

Sin entrar en más detalle, concluimos de la encuesta !

- a) - falta de formación del equipo técnico.
- b) - problemática producida por defectos en el proceso, y no por la sustancia y su carácter no newtoniano - (control);
- c) - incapacidad material del laboratorio para abordar - un estudio sistemático reológico y de control en es te aspecto.
- d) - falta de una normalización en las medidas, en proce so y el laboratorio, para que sean reproductibles y fiables.

e) - Los principales problemas que se presentan son :

- el bombeo de las sustancias.
- la circulación de éstas : en tubería.
en medio poroso.
- su dificultad de aplicación : en proceso.
como producto acaba
do.

En vista de estos resultados del sondeo industrial, se decidió realizar un estudio de la instrumen
tación existente y un análisis sistemático de los parame
tros característicos de los fluidos no newtonianos de -
comportamiento pseudoplástico, aplicando los resultados -
de éstos a un caso de derrame a través de un medio poroso,
como caso más general de flujo, dada su compleja geome
tría.

C A P I T U L O I

FLUIDOS NO NEWTONIANOS : CARACTERISTICAS, PARA
METROS Y FUNCIONES REOLOGICAS

La armonía resultado de tensiones opuestas, como en
un arco. (HERACLITO)

C A P I T U L O I

FLUIDOS NO NEWTONIANOS : CARACTERISTICAS, PARAMETROS Y FUNCIONES REOLOGICAS.

1.1. - DEFORMACION DE LA MATERIA

Suponemos la materia constituida por una distribución continua de elementos denominados partículas. En cada instante, estas partículas ocupan una cierta posición en el espacio tridimensional, ofreciéndonos una configuración. Si en el transcurso del tiempo observamos sucesivas configuraciones, el cuerpo estará en movimiento (1, 2, 6, 14).

Dicho movimiento vendrá dado por una configuración de referencia, y el paso de una a otra se puede definir por una función de deformación, que puede ser, descompuesta, en los clásicos componentes de traslación, rotación y deformación, quedando definida esta última a partir de la ecuación del movimiento más general de una partícula (fig. 1.1.)

$$\vec{q}_m = \vec{q} + \vec{b} \cdot \vec{dr} = \vec{q} + 1/2(\vec{v} \wedge \vec{q}) \wedge \vec{dr} + \vec{d} \cdot \vec{dr}$$

en el caso de un sólido rígido se expresa :

$$\vec{q}_m' = \vec{q} + 1/2 (\vec{v} \wedge \vec{q}) \wedge \vec{dr}$$

de donde :

$$\vec{d} \cdot \vec{dr} = \vec{q}_m - \vec{q}_m'$$

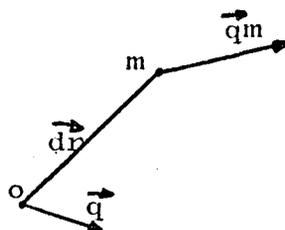


Figura 1.1.

siendo ésta la velocidad de deformación y \underline{d} el tensor velocidades de deformación.

El tensor deformación vendrá determinado por el tiempo y el tensor velocidades de deformación y produ

$$\underline{\epsilon} = \underline{\dot{d}} \cdot dt = \underline{\dot{\epsilon}} \cdot dt$$

cido por la aplicación de una tensión al cuerpo que se deforma.

Si se observa el diagrama tensión-deformación de un sólido elástico lineal, más allá del límite elástico encontramos que la deformación total producida se descompone en dos (fig. 1.2.) : una residual, permanente o de carácter fluido, resultado de entrar en la zona de fluencia, y otra deformación elástica, recuperable e instantáneo (4, 5, 7).

$$\epsilon_T = \epsilon_f + \epsilon_e$$

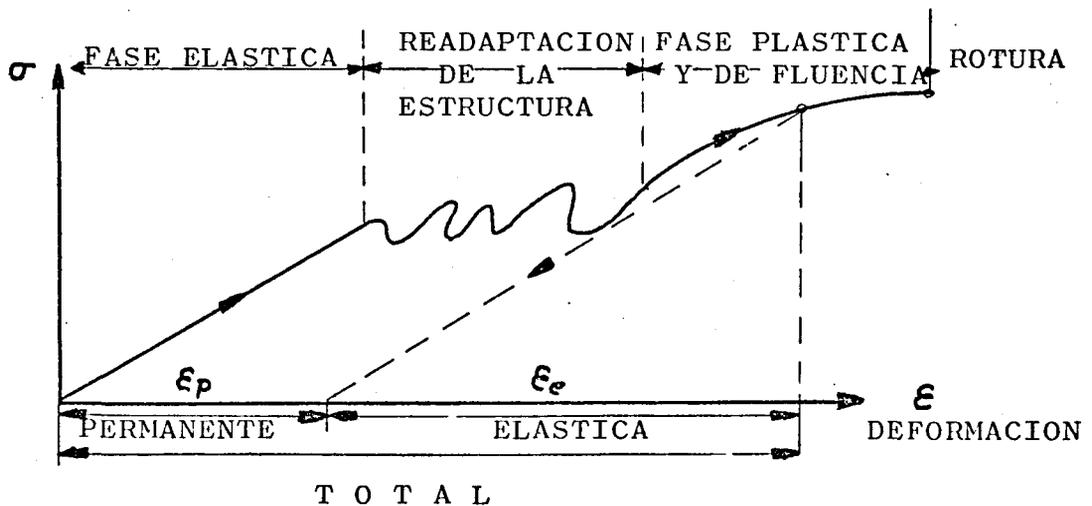


Figura 1.2.

Este mismo fenómeno de fluencia se observa - en los ensayos lentos de relajación.

Hay que destacar que la deformación de las - probetas en la zona de fluencia se realiza con estricción en la sección y de tal manera que el proceso es isócoro. En la mecánica del sólido, normalmente, se trabaja en la zona elástica, no presentándose problemas de tipo cinemático, siendo el estudio estático o cuasi estático, por - lo tanto, sucesión de estados de equilibrio definidos - por la ecuación termodinámica de estado, por ejemplo, la ley de HOOKE, en la cual considerar la velocidad de des-

$$f(\sigma, v, T) = 0 \quad \bar{\epsilon} = E \cdot \bar{\epsilon}$$

plazamiento de las partículas no tiene ningún interés.

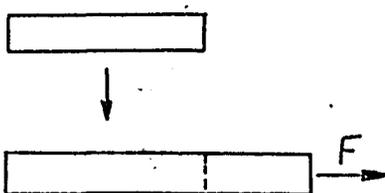
Observemos dos procesos de deformación en el caso de fluidos. Si en el émbolo de un cilindro que encierra un gas o un líquido variamos el esfuerzo aplicado, obtenemos una deformación de volumen regida por la ecuación de estado.

$$f(p, v, T) = 0$$

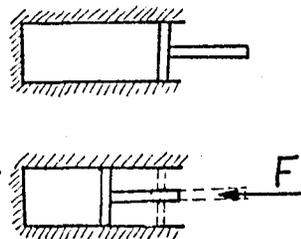
en el caso de un gas : $p \cdot v = n \cdot R \cdot T$

en el caso de un líquido : $\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta p}$

En el momento en que cese la acción, el - fluido volverá a la configuración inicial de igual manera que un sólido elástico lineal (fig. 1.3.).



Sólido elástico lineal



Gas o líquido
evolución isotérmica

Figura 1.3.

La otra evolución a observar es la producida por un esfuerzo cortante en un fluido newtoniano (experiencia de NEWTON) ; en realidad en cualquier fluido puramente viscoso. La deformación del fluido se incrementa en el tiempo y mientras dura el estado de tensiones que la origina. El equilibrio de la deformación nunca se alcanza, observándose la manifestación de la viscosidad, - gracias a la existencia del gradiente de velocidades que produce el equilibrio de fuerzas (fig. 1.4.).

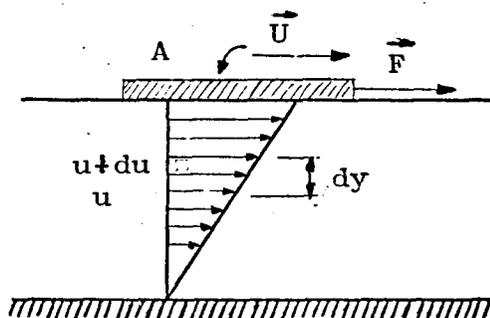


Figura 1.4.

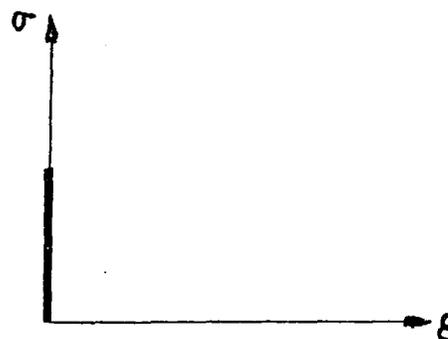


Figura 1.5.

De aquí concluimos el idéntico comportamiento frente a una tensión de los cuerpos sólidos y fluidos. En ambos, la deformación del cuerpo da un trabajo por frotamiento entre las partículas, que se relaciona con el desplazamiento relativo en los sólidos o con la velocidad relativa en los fluidos. Cualquier material podrá ser situado o clasificado, al observar su carácter dominante, que dependerá de la sollicitud a que se le someta dentro de cierta escala de tiempos.

Este hecho nos lleva a hablar de cuerpos - elásticos, viscosos, viscoelásticos, etc. y así tendremos los cuerpos :

RIGIDOS : sólido ideal de EUCLIDES, indeformable o perfecto $\bar{\epsilon} = 0$. Lo estudia la geometría y la Mecánica Racional (fig. 1.5.).

ELASTICOS PERFECTOS : relación biunívoca entre tensión y deformación hasta alcanzar el límite de elasticidad $\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon})$. Un caso particular es el elástico lineal de HOOKE (fig. 1.6.).

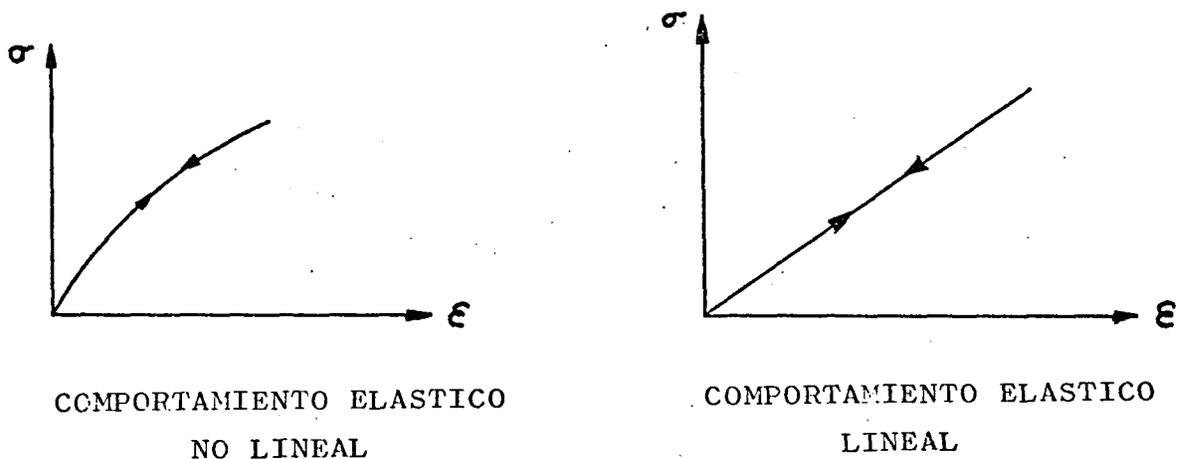


Figura 1.6.

ELASTOVISCOSOS : su expresión general es del tipo :

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}})$$

Casos particulares serán los sólidos simples de VOIGTI Y de KELVIN

$$\sigma = E \cdot \epsilon + \mu \cdot \dot{\epsilon}$$

y los generalizados correspondientes.

FLUIDO PERFECTO DE PASCAL : se define por $\mu = 0$ y por una perfecta elasticidad $\tau = f(\epsilon)$.

LIQUIDO VISCOSO : se rige por la expresión -

$$\tau = \mu (\dot{\epsilon})$$

Un caso especial es el fluido de NEWTON (fig. 1.7.).

$$\sigma = \mu \cdot \dot{\epsilon}$$

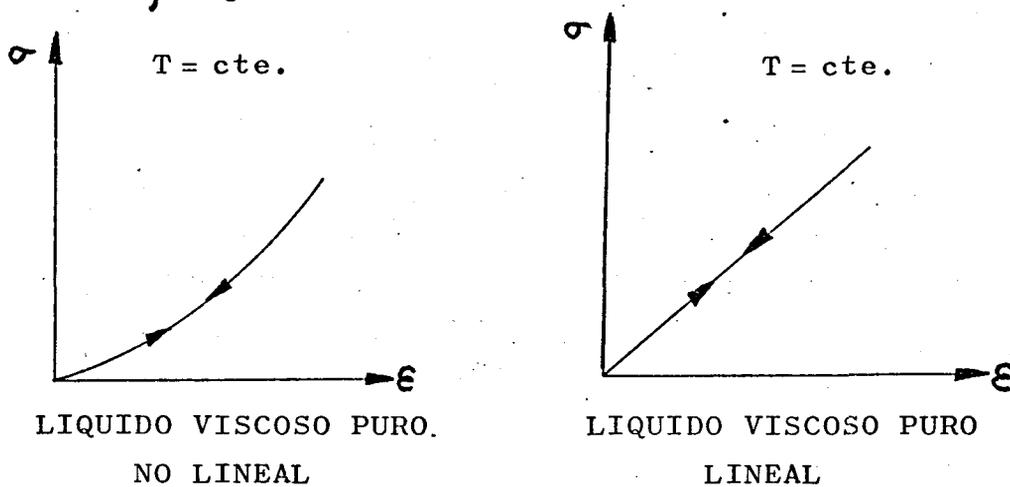


Figura 1.7.

En este grupo entran los no newtonianos perfectamente viscosos. En estos casos se pueden presentar fenómenos de fatiga (reversible) y envejecimiento (no reversible).

LIQUIDOS VISCOELASTICOS : expresión análoga al correspondiente elastoviscoso. Casos particulares son el líquido de MAXWELL (fig. 1.8.) y el correspondiente generalizado.

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad \begin{cases} \tau = \mu \dot{\epsilon}_2 \\ \tau = E \epsilon_1 \end{cases}$$

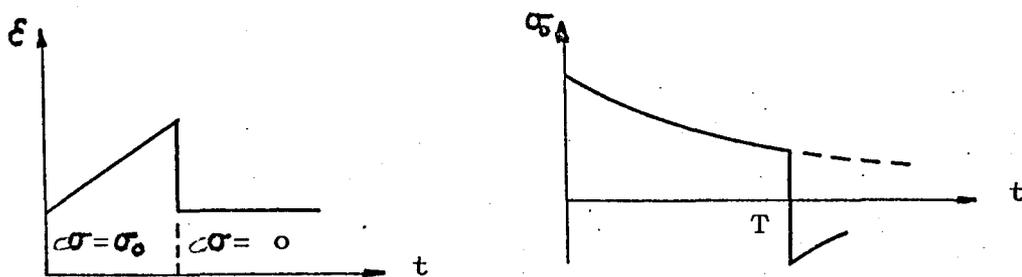


Figura 1.8.

CUERPOS PLASTICOS : su comportamiento viene definido por (fig. 1.9.)

$$\tau = f(\epsilon) \text{ si } \tau < \tau_0$$

$$\tau = f(\dot{\epsilon}) \text{ si } \tau > \tau_0$$

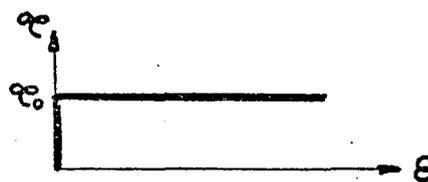
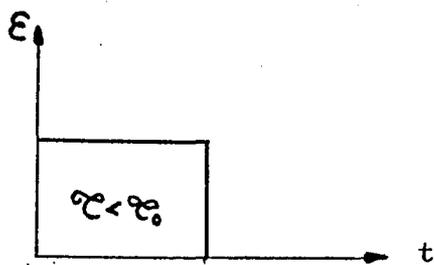


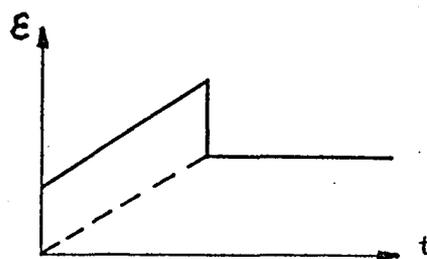
Figura 1.9.

Casos particulares son los plásticos de BINGHAM y de KEPES (fig. 1.10.). (El de KEPES es combinación de un cuerpo elástico de HOOKE y uno de esfuerzo proporcional a la deformación).



BINGHAM

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\epsilon}$$



KEPES

$$\tau = E \cdot \epsilon + K \frac{\dot{\epsilon}}{|\dot{\epsilon}|} |\epsilon|$$

Figura 1.10.

Otros comportamiento se representan en las figuras 1.11.

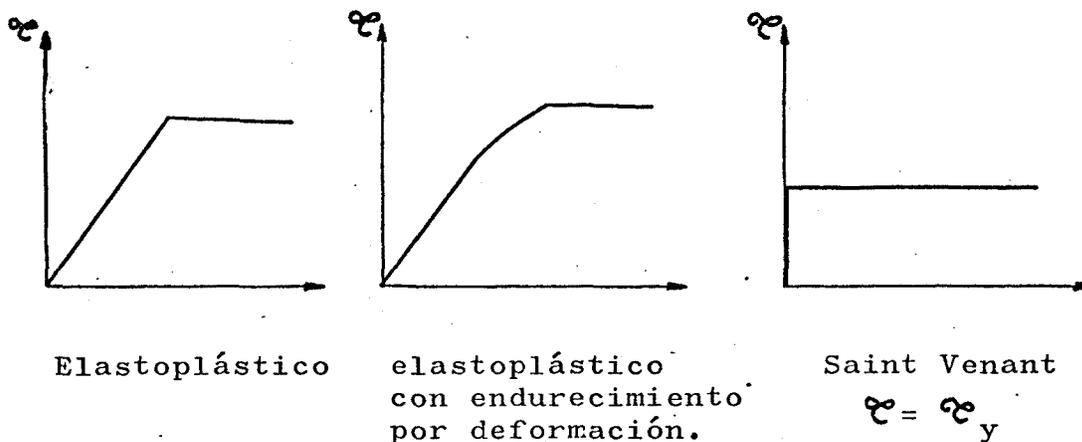
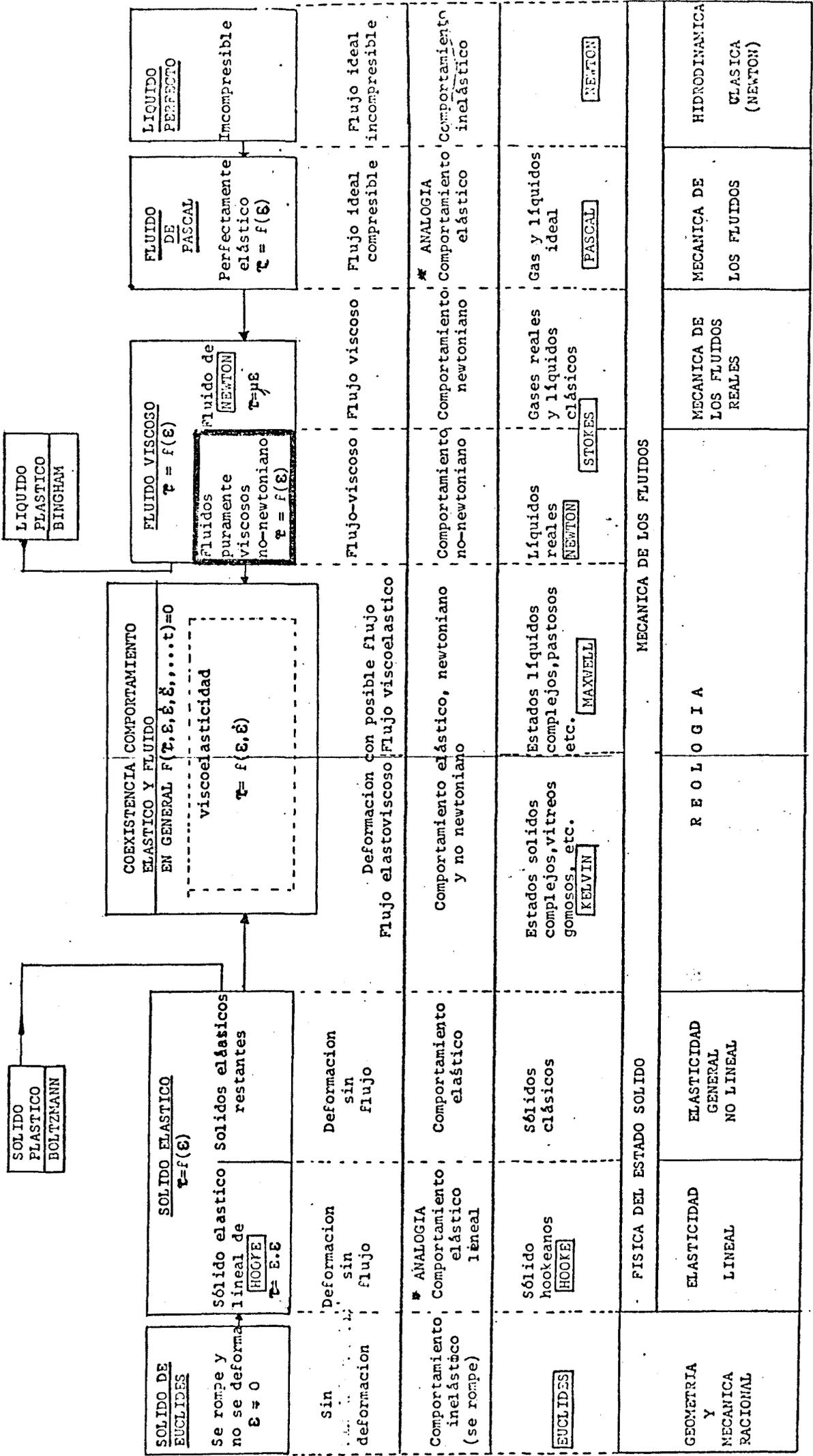


Figura 1.11.

CUERPOS HETEROGENEOS : caso más general, con un modelo matemático del tipo $f(\sigma, \epsilon, \dot{\epsilon}, \ddot{\epsilon}, \dots, t) = 0$. - Pueden presentar carácter viscoso o no y elástico o no y mixtos. Pueden tener efectos de memoria. Algunos casos son la tixotropía y la dilatancia y la viscoelasticidad propiamente dicha (1, 2, 4, 5, 14).

En el cuadro adjunto se presenta el amplio espectro de los comportamientos de la materia al deformarse frente a los esfuerzos. Las flechas señalan aumento de complejidad. También se indican las sustancias afectadas y la parte de la ciencia que estudia cada comportamiento.

En el cuadro I observamos la situación de los fluidos no newtonianos, objeto de este estudio, en todo el contexto de los materiales deformables.



1.2. - LCS FLUIDOS NO NEWTONIANOS. ECUACION DE ESTADO

Hemos localizado los fluidos no newtonianos en el amplio espectro de cuerpos deformables y conocemos la relación reológica que los caracteriza en su forma más general, y que define los fluidos puramente viscosos, - siendo ésta :

$$\underline{\underline{\sigma}} = f(\underline{\dot{\epsilon}})$$

El concepto de fluido va ligado a la característica de no poderse alcanzar en él el equilibrio de de formación al someterlo a un estado de esfuerzos cortantes por pequeños que éstos sean.

El estado de tensiones viene representado - por el tensor tensión que admite la descomposición en uno isótropo (esférico o traza) y otro desviador (también llamado viscoso). $\underline{\underline{\sigma}} = -\underline{\underline{p}} + \underline{\underline{\sigma}}_{\mu}$

De esta descomposición viene el concepto de presión hidroestática, siempre que no existan gradientes de velocidades en el seno del fluido.

$$p = p_0 = -\frac{1}{3} \text{ traza } \underline{\underline{\sigma}} = -\frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = -\frac{1}{3} \sigma_i$$

En este caso, el concepto de presión en un punto y el de presión hidroestática coinciden.

La primera hipótesis del fluido puramente viscoso es la de que $\underline{\underline{\sigma}}$ en reposo es esférico -

$$\underline{\underline{\sigma}}(\text{reposo}) = -\underline{\underline{p}}_0 = -p_0 \underline{\underline{1}}$$

La presión es una variable dinámica. El comportamiento dinámico del fluido no cambia si se aplica un esfuerzo normal suplementario, de igual manera que en un sólido el estado hidroestático no afecta a la fluencia del cuerpo (BRIGMAN Y BECKER) (5).

Como segunda hipótesis, para determinar el modelo de fluido puramente viscoso, se establece en el caso de movimiento, la relación entre la parte desviadora del tensor esfuerzo y el tensor velocidades de deformación y la temperatura, es decir (1,2,7) $\bar{\tau}_{\mu} = f(\bar{\dot{\epsilon}}, T)$ - cumpliéndose que $\tau_{\mu} = 0$ si $\bar{\dot{\epsilon}} = 0$.

La homogeneidad del fluido es la tercera hipótesis a considerar, lo que excluye emulsiones, suspensiones y fenómenos de transmisión de calor con gradientes de temperatura (en algunos casos podrá ser esta hipótesis salvado no considerándose con todo rigor así como las anteriores, p.e., con los plásticos de BINGHAM).

A estas hipótesis se añaden las de STOKES y de REINER-RIVLIN (7,14) que son :

1. - El fluido es isótropo.
2. - La parte desviadora del tensor tensión se puede expresar como un polinomio del tensor velocidad de deformación (14) de forma :

$$\tau_{\mu ij} = A_{mn}^{ij} \dot{\epsilon}^{mn} + B_{mn}^{ij} \dot{\epsilon}^{mr} e_r^n + C_{mn}^{ij} \dot{\epsilon}^{mr} e_r^s \dot{\epsilon}_s^n + \dots$$

Los coeficientes, A_{mn}^{ij} , B_{mn}^{ij} , C_{mn}^{ij} , ... , tensores de cuarto orden, son las propiedades del fluido, dependiendo del estado termodinámico del sistema.

Según las últimas hipótesis enunciadas, el fluido de STOKES es isótropo. Luego, las tensiones serán isótropas y podremos escribir para cualquier coeficiente

$$A_{mn}^{ij} \dot{\xi}^{mn} = A_1 I \delta_{ij} + 2 A_2 \dot{\xi}_{ij}$$

A_1 y A_2 escalares, funciones de la temperatura, y I el primer invariante de $\dot{\xi}$.

Esta nueva expresión de los coeficientes es válida para cualquier instante de tiempo, pues A_1 y A_2 no varían con el flujo y lo hacen solo con la temperatura.

Según esto, escribimos :

$$\begin{aligned} \varphi_{\mu ij} &= F(\dot{\xi}, T) \delta_{ij} + 2 A_2 \dot{\xi}^{ij} + 2 B_2 \dot{\xi}^{im} \dot{\xi}_m^i + \\ &+ 2 C_2 \dot{\xi}^{im} \dot{\xi}_{mn}^n \dot{\xi}_n^i + \dots \end{aligned}$$

siendo $F(\dot{\xi}, T) = F(I, II, III, T)$, que cumple $F(\dot{\xi}, T) = 0$ cuando el movimiento es nulo ($\dot{\xi} = 0$).

En forma tensorial :

$$\overline{\varphi}_{\mu} = F(I, II, III, T) + 2 A_2 \overline{\dot{\xi}} + 2 b_2 \overline{\dot{\xi}}^2 + c_2 \overline{\dot{\xi}}^3 + \dots$$

que admite simplificación por el teorema de CAYLEY-HAMILTON, del que deducimos :

NOTA.- Invariantes principales del tensor :
 $I = \text{traza } \dot{\xi} = \text{div. } \vec{q}$; $II = 1/2 (I^2 - \text{traza})(\dot{\xi})^2$;
 $III = \text{determinante } (\dot{\xi})$.

$$\bar{\bar{\bar{\tau}}}_3 = I \bar{\bar{\tau}}_2 - II \bar{\bar{\tau}}_1 + III \bar{\bar{\tau}}_0 ; \bar{\bar{\bar{\tau}}}_4 = \bar{\bar{\tau}}_3^2, \text{ etc.}$$

y sustituyendo :

$$\bar{\bar{\tau}}_\mu = \alpha_0 \bar{\bar{\tau}}_0 + \alpha_1 \bar{\bar{\tau}}_1 + \alpha_2 \bar{\bar{\tau}}_2$$

en que α_0 , α_1 y α_2 son polinomios de los invariantes I, II y III y de la temperatura, cumpliéndose que $\alpha_0 = 0$ si $\bar{\bar{\tau}} = 0$. Esta última ecuación es la de estado de un fluido de STOKES, que expresada por componentes es :

$$\tau_{\mu ij} = \alpha_0 \delta^{ij} + \alpha_1 \dot{\epsilon}^{ij} + \alpha_2 \dot{\epsilon}^{im} \dot{\epsilon}_m^j$$

En las aplicaciones prácticas de esta expresión se desconoce la relación entre α_i y III, y los esfuerzos normales no se consideran. Ya hemos indicado que no influyen en la dinámica del fluido y van asociados a α_2 , por lo que concluimos que α_2 es despreciable frente a α_i y éste sólo es función de II, es decir !

$$\alpha_0 (I, II, III, T) \rightarrow \alpha_0 (I, T)$$

$$\alpha_1 (I, II, III, T) \rightarrow \alpha_1 (I, II, T)$$

$$\alpha_2 (I, II, III, T) \rightarrow \alpha_2 \text{ no se considera.}$$

Así, la ecuación se reducirá a :

$$\bar{\bar{\tau}}_\mu = \alpha_0 \bar{\bar{\tau}}_0 + \alpha_1 \bar{\bar{\tau}}_1$$

NOTA.- Teorema de CAYLEY-HAMILTON (15) : todo tensor de segundo orden $\bar{\bar{\tau}}$ verifica la ecuación tensorial $f(\bar{\bar{\tau}}) = 0$ asociada a una ecuación característica $f(\lambda) = \lambda^3 - I \lambda^2 + II \lambda - III$
 $f(\bar{\bar{\tau}}) = \bar{\bar{\tau}}^3 - I \bar{\bar{\tau}}^2 + II \bar{\bar{\tau}} - III \bar{\bar{\tau}}_0$

Este modelo representa, aunque inexactamente, los fluidos no newtonianos en derrames simples, en la mayoría de los cuales la ecuación de estado se puede reducir suponiendo $\alpha_0 = \lambda(T)$ y aún más $\bar{\tau}_\mu = \alpha(Y) \bar{\dot{\epsilon}}$

siendo $Y = 1/2 \dot{\epsilon}_n^m \epsilon_m^n$, y que definida $\tau^2 = 1/2 \epsilon_{\mu n}^m \tau_{\mu m}^n$

se obtiene :

$$\tau_{\mu}^{ij} = \alpha(\tau^2) \dot{\epsilon}^{ij} \quad I$$

expresión ya utilizable, p.e., en un viscosímetro capilar, (fig. 1.12.) que nos da las variaciones de la viscosidad aparente de un fluido pseudoplástico (14).

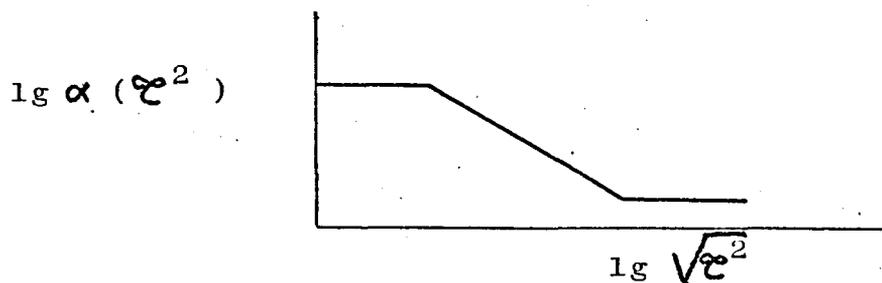


Figura 1.12.

1.3. - APLICACION DE LA ECUACION DE ESTADO A CASOS PARTICULARES

Diversos modelos matemáticos de comportamiento de los fluidos no newtonianos se han realizado para -

cubrir las necesidades de problemas de fluidos concretos.

Uno de los modelos más generalizados es la ley de potencia o de OSTWALD -de WAELE-NUTTING (14 y diversos). En ella :

$$\alpha(\tau^2) = 2m^{1/m} (\tau^2)^{-(1-n)/2n} = 2K (-2\text{traza}(\dot{\epsilon}^2))^{(n-1)/2}$$

siendo m, n y K parámetros característicos ; K, m coeficientes de consistencia ; n, índice de comportamiento - fluido (METZNER Y REED) :

si $n < 1$, estamos en presencia de pseudoplasticidad.

si $n > 1$, estamos en presencia de dilatancia.

si $n = 1$, el modelo se ajusta al de NEWTON y $m = \mu$

Cuando los esfuerzos son pequeños suele emplearse el modelo de ELLIS. En él !

$$\alpha(\tau^2) = \frac{2\mu_0}{1 + \mu_0 m^{-1/n} (\tau^2)^{(1-n)/n}} =$$

$$= \frac{a}{1 + b (-2 \text{ traza}(\dot{\epsilon}^2))^{(n-1)/2}}$$

cuando $n < 1$, α tiende a $2\mu_0$ y τ^2 a 0 (disoluciones de polimeros).

El modelo de SISKO se suele emplear para esfuerzos de cortadura elevados, siendo éste :

$$\alpha(\tau^2) = 2\mu_\infty + 2m^{1/n} (\tau^2)^{-(1-n)/2n} = 2A + 2B (-2\text{traza}(\dot{\epsilon}^2))^{(n-1)/2}$$

En él, α tiende a $2\mu_\infty$, si τ^2 se hace infinito, y para bajos esfuerzos de cortadura, α tiende a ∞ (grasas).

REINER-PHILIPPOFF dan un modelo con :

$$\alpha (\varphi^2) = 2\mu_0 + \frac{2 (\mu_0 \text{ y } \mu_\infty)}{1 + \varphi^2/G}$$

También de REINER :

$$\alpha (\varphi^2) = \frac{2 \mu_\infty}{1 - \mu_\infty (1/\mu_\infty - 1/\mu_0) e^{-\varphi^2/\chi^2}}$$

G y χ^2 son constantes a determinar experimentalmente.

Otro es, el modelo de EYRING-REE

$$1/2 \alpha (\varphi^2) = \sum_{k=1}^{N_s} x_k \frac{\beta_k}{a_k} + \sum_{k=N_s+1}^N x_k \frac{\beta_k}{a_k}$$

$$\frac{\sinh^{-1} (2\beta_k \sqrt{Y})}{2 \beta_k \sqrt{Y}}$$

N_s y $(N-N_s)$ es el número de fluidos newtonianos y no newtonianos que componen el modelo ; x_k , "fracción de área" ocupada por el flujo de k tipos de fluidos; β_k y a_k , constantes empíricas. El modelo resulta francamente complejo de aplicación.

En el apartado que sigue se hace una exposición detallada de los diversos modelos de comportamiento fluidos no newtonianos, tanto de origen teórico como empírico, y sus aplicaciones.

1.4. - DIVERSOS COMPORTAMIENTOS DE LOS FLUIDOS NO NEWTONIANOS. COMPORTAMIENTOS COMPLEJOS

En el apartado anterior 1.3. se da la definición matemática de los fluidos puramente viscosos, dentro de los cuales se encuentran los no newtonianos. Para ello se ha partido de las hipótesis de REINER-RIVLIN-STOKES, llegándose a la expresión de la ecuación de estado reológica :

$$\tau_{ij}^{\mu} = \alpha (\tau^2) \dot{\epsilon}^{ij}$$

que nos relaciona el tensor esfuerzos viscosos con el tensor velocidades de deformación. La función $\alpha (\tau^2)$ ha sido expuesta para diferentes modelos según diversos autores.

A continuación pasamos a describir el comportamiento de los diversos fluidos no newtonianos. Para una mejor comprensión, simplificamos la ecuación de estado reológica, forma tensorial, pasando a una ecuación escalar que llamamos simplemente función reológica y que se expresa, en el caso de un derrame plano, como :

$$\tau_{xy} = f (du/dy)$$

Esta función reológica es la expresión matemática del reograma o representación gráfica que indica la respuesta, en gradientes de velocidad producidos, en un fluido con cierta evolución creciente o decreciente de los esfuerzos cortantes que se le aplican.

La función reológica podrá adoptar también - la forma (2,3,4,8,14,16,17,18,21,22) :

$$\tau_{r\theta} = f (du_{\theta}/dr)$$

cuando el derrame tenga simetría de revolución (que hemos expresado en coordenadas cilíndricas).

1.4.1. - COMPORTAMIENTO NEWTONIANO

La característica de un fluido de NEWTON, o de comportamiento newtoniano, es la proporcionalidad entre esfuerzos cortantes y gradientes de velocidades.

$$\tau_{xy} = \mu \cdot du/dy$$

El coeficiente reológico es la viscosidad - dinámica del fluido, dependiente sólo de la temperatura y de la presión. Otras variables, tales como la concentración, grado de pureza, emulsificación, etc., podrán también intervenir, aunque desde el punto de vista dinámico de nuestro estudio no las consideramos por el momento.

Todos los gases presentan un comportamiento newtoniano, así como muchos líquidos y soluciones de solutos con bajo peso molecular (agua, lubricantes, gasolinas, etc.).

La viscosidad es la pendiente de la recta -
del reograma (fig. 1.15.)

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha$$

Otras representaciones características de los fluidos -
newtonianos se muestran en la figura 1.13.

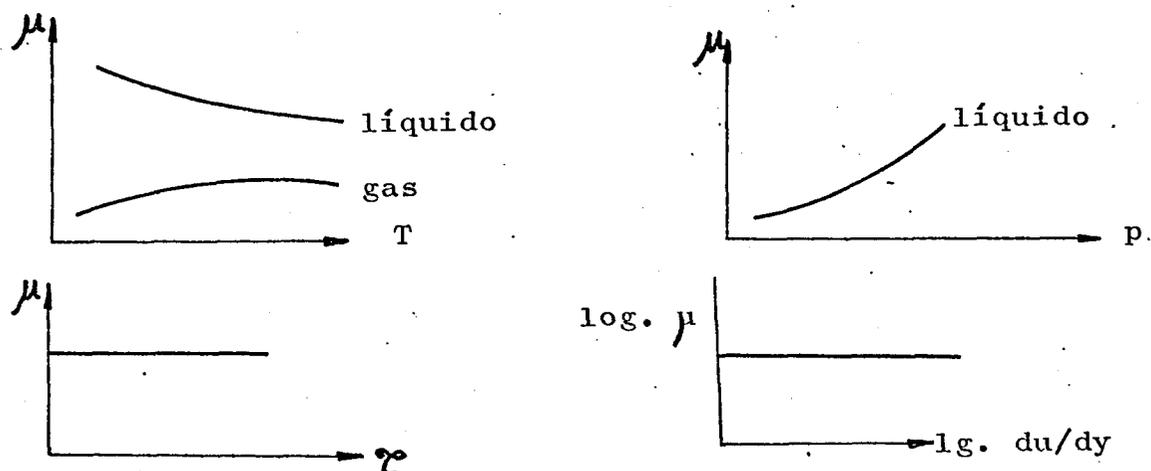
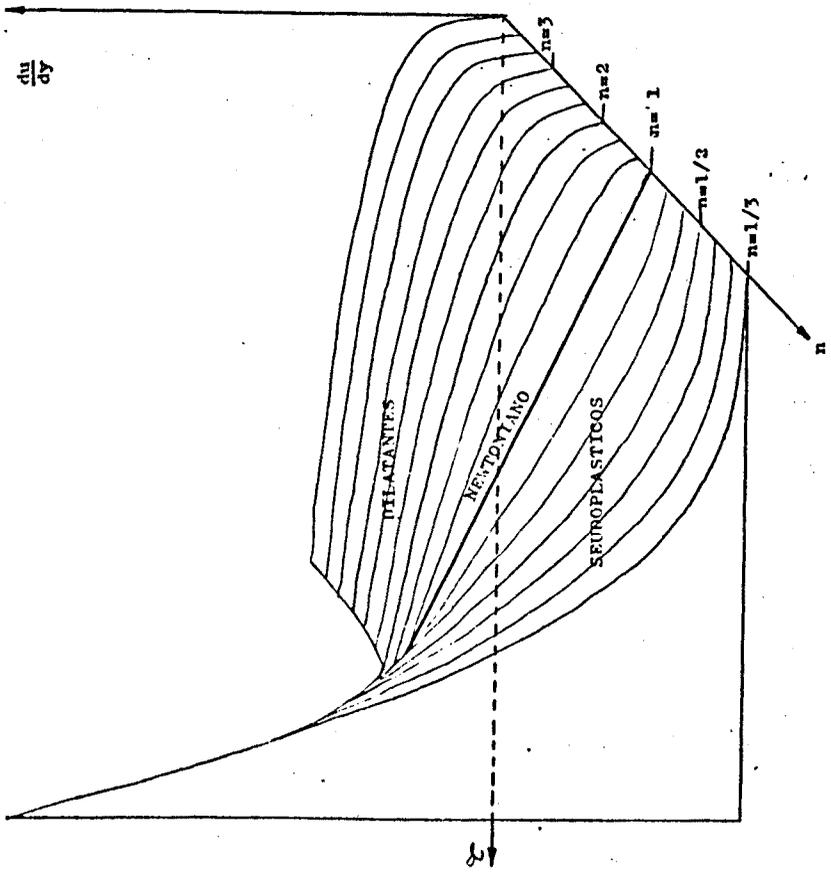


Figura 1.13.

En general, podemos predicar que son newtonianos los líquidos de baja viscosidad con moléculas no ramificadas, dependiente su comportamiento de las características fisicoquímicas, tales como la forma y disposición de las moléculas, la concentración, el tipo de enlace molecular, la formación de micelas, los encadenamientos (13,23), aunque posiblemente este modelo no exista y quede enmascarado por la precisión hoy exigida y alcanzable en las medidas de caracterización.

REPRESENTACION TRIDIMENSIONAL DE
LA LEY DE OSTWALD-DE WAELE

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$



Coordenadas arbitrarias.

Fig.-1.14

- NEWTONIANO $\mu = \tau g \alpha$
- PLASTICO $\mu = \tau g \beta$
- SEUDOPLASTICO $\mu_0 = \tau g \alpha_1$
 $\mu_{\infty} = \tau g \beta_1$
- DILATANTE $\mu_0 = \tau g \alpha_2$
 $\mu_{\infty} = \tau g \beta_2$

Gradiente de
velocidades
 $\left[\frac{du}{dy} \right]$

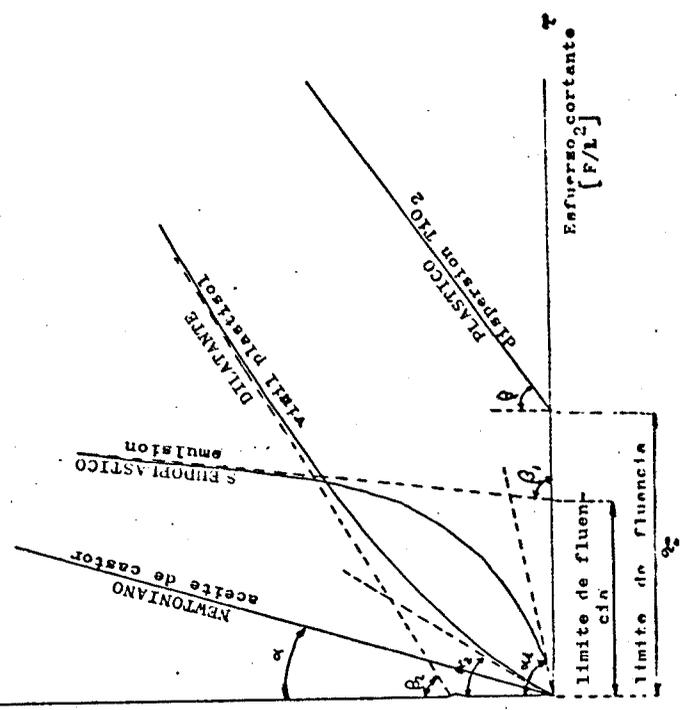


Fig. 1.15

1.4.2. - COMPORTAMIENTO SEUDOPLASTICO

Comprende una gran parte de los fluidos no newtonianos. En realidad, diversos autores, SCOTBLAIR y otros, consideran a todos los fluidos inelásticos, tixotrópicos o reopécticos, con cierto carácter pseudoplástico. El hecho de que los pseudoplásticos tengan, en el origen del reograma, la función reológica tangente al eje de esfuerzos cortantes enmascara, en cierta manera, un comportamiento plástico y viceversa.

Dentro de los fluidos de comportamiento pseudoplástico, tenemos los cultivos de microorganismos, bacterias, levaduras y hongos (*Streptomyces griseus*, *Penicillium chrysogenum*, *Streptomyces feanacycetina*, *Coriothyrius hellebonio* (12); las soluciones de polímeros; tales como las de C.M.C., el Polyox, las Tylosas; las dispersiones coloidales de grafito; las emulsiones, el caucho líquido, las fundiciones, las colas, las proteínas, los barnices, los olaciacres, los zumos de frutas y vegetales, los purés, las pastas de sopa y las sopas, las salsas, los néctares, las melazas, los adhesivos, etc. (1,2,10, 11,13) presentando, en realidad, casi todos un comportamiento complejo, cuya característica más destacada es la pseudoplasticidad.

Al observar el reograma, fig. 1.15, apreciamos el arranque tangencial de la función reológica en el origen, apareciendo como un esfuerzo de cortadura inicial que normalmente escapa a la precisión de la representación (sensibilidad del aparato de medida). La curva presenta una concavidad hacia las cortaduras negativas; su

pendiente va decreciendo al aumentar la sollicitación de cortadura. Esta pendiente se define como viscosidad diferencial.

$$\mu_d = \frac{d\tau}{d(du/dy)}$$

Esta viscosidad viene dada por el ángulo de la tangente, en un punto del reograma, con el eje de los esfuerzos cortantes, siendo un concepto bastante empleado en la industria.

También se define la viscosidad aparente en un punto como el cociente :

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{du/dy}$$

y es la que tendría el fluido newtoniano cuyo reograma, recta, pasase por el punto en cuestión (2,3,16,17,18,21, 24).

Para gradientes de velocidades poco elevados, son próximos los valores de viscosidad aparente y diferencial. Se define μ_0 newtoniano o límite para el gradiente de velocidades nulo. Para valores elevados del gradiente de velocidades, el reograma admite una aproximación a una asíntota y encontraremos :

$$\mu_{dif} \approx \mu_{ap} \approx \mu_{\infty}$$

en que μ_{∞} es la pendiente de la asíntota, hablándose de límite de fluencia aparente o comportamiento binghamiano aparente.

En el caso de fluidos pseudoplásticos, se habla de propiedad viscosa estructural, dado que su comportamiento se explica por sus propiedades moleculares y coloidales, tales como la forma de la molécula, el tamaño de ésta, su flexibilidad y aptitud para deformarse, su grado de disolución, la presencia de cargas eléctricas, etc. (2,3,13). En general, en los fluidos de comportamiento pseudoplástico se observa la presencia de moléculas lineales rígidas y macromoléculas filiformes, normalmente disueltas en fluidos newtonianos. Inicialmente, las moléculas pueden estar distribuidas al azar y sufrir una orientación por cizallamiento (la orientación será paralela al flujo), siendo el tipo de derrame más frecuente el laminar o en capas, de forma que el intercambio molecular entre capas y la tendencia al desorden sean mínimos (movimiento browniano). Si la estructura es filiforme, se puede producir una expansión y desarrollo de la macromolécula segregando parte del disolvente retenido y fluidificándose el movimiento (fig. 1.16.). Una vez al-

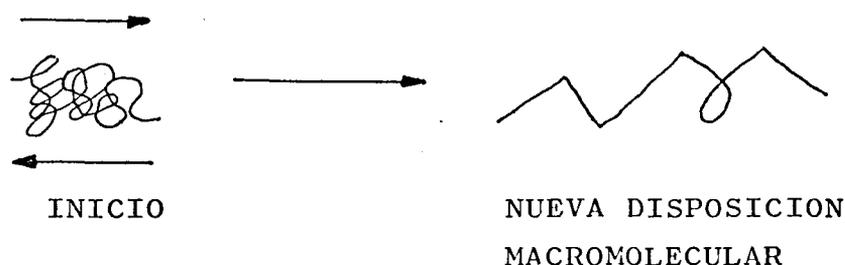


Figura 1.16.

canzada la ordenación del conjunto, el fenómeno se estabiliza llegándose a la zona asíntota del reograma. Hay que destacar la influencia de la temperatura en este com

portamiento, pues el movimiento browniano es constante - para una temperatura y crece con ella. El movimiento turbulento será otra de las causas que pueda alterar este comportamiento, pero la misma complejidad del fluido hace que su aparición se retarde y prácticamente nunca se alcance.

Otras representaciones gráficas típicas para los fluidos seudoplásticos son las de la fig. 1.17.

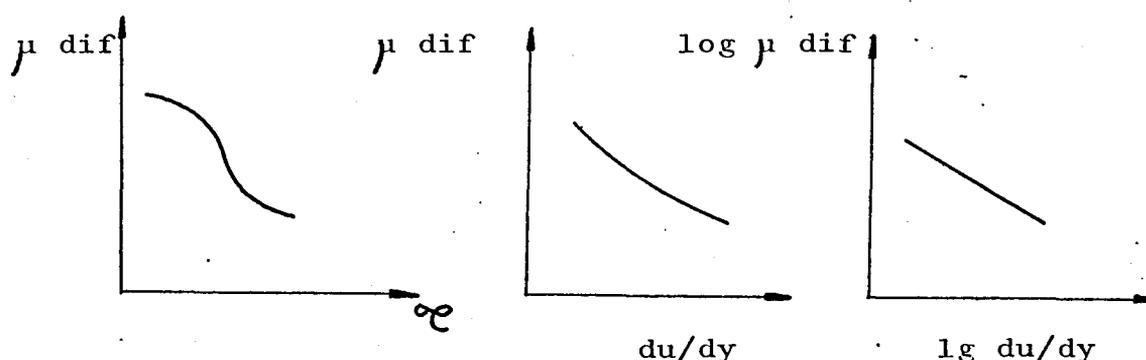


Figura 1.17.

1.4.3. - COMPORTAMIENTO DILATANTE

Los fluidos de comportamiento dilatante presentan un reograma opuesto al de los seudoplásticos. La viscosidad aparente aumenta al crecer el gradiente de ve locidades. La concavidad del reograma se divide hacia - las cortaduras positivas (2,3,10,13,16,17,18,19,20,21,22, 23,24).

Este comportamiento se presenta en dispersiones compactas (altas concentraciones) p.e., harina de maiz en agua, sedimentos de pinturas al aceite, polvos de sinterización, pólvora, dispersiones, rocas, napalm, queroseno, arena húmeda. Se supone que (REYNOLDS) el fluido en reposo agrupa paquetes de moléculas, quedando entre ellas pequeños volúmenes libres llenos de líquido que, en la fase inicial del movimiento, actúan como lubricante. Al aumentar el gradiente de velocidades los aglomerados de moléculas se disgregan dando un incremento de volumen de los vacíos y de la superficie de la fase dispersa que no puede ser llenado por el fluido existente, impidiéndose así la lubricación de las moléculas y apareciendo, por esto, un rozamiento "sólido" entre ellas, con el consiguiente aumento de esfuerzo cortante y viscosidad aparente.

En la figura 1.15. se definen conceptos análogos a los de los fluidos de comportamiento pseudoplástico en los límites del reograma, obteniéndose también los valores de μ_0 , para du/dy bajos, y de μ_∞ en la zona asintótica de altos gradientes de velocidad.

Otras representaciones que muestran el comportamiento dilatante vienen en la fig. 1.18.

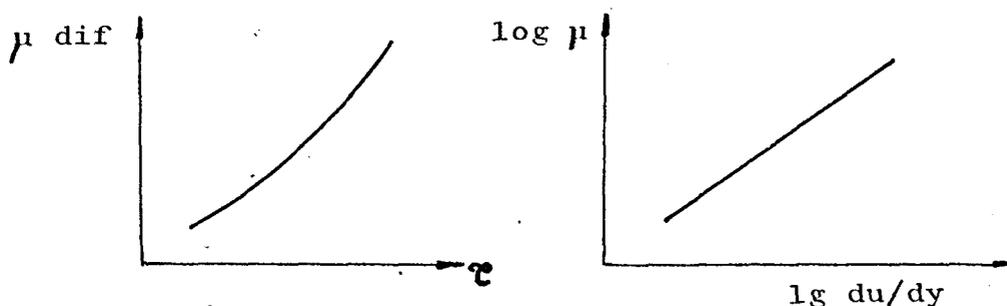


Figura 1.18.

1.4.4. - COMPORTAMIENTO PLASTICO

Los fluidos que presentan este comportamiento precisan que se les someta a un esfuerzo cortante mínimo

τ_0 para empezar a fluir. Para valores del esfuerzo cortante menores que τ_0 el comportamiento será como el de un sólido (2,3,10,13,16,17,18,19,20,21,22,23,24).

En la zona de fluencia, el reograma podrá ser rectilíneo (fig. 1.15) o curvo (fig. 1.19), lo que indica un comportamiento de tipo dilatante o pseudoplástico o newtoniano.

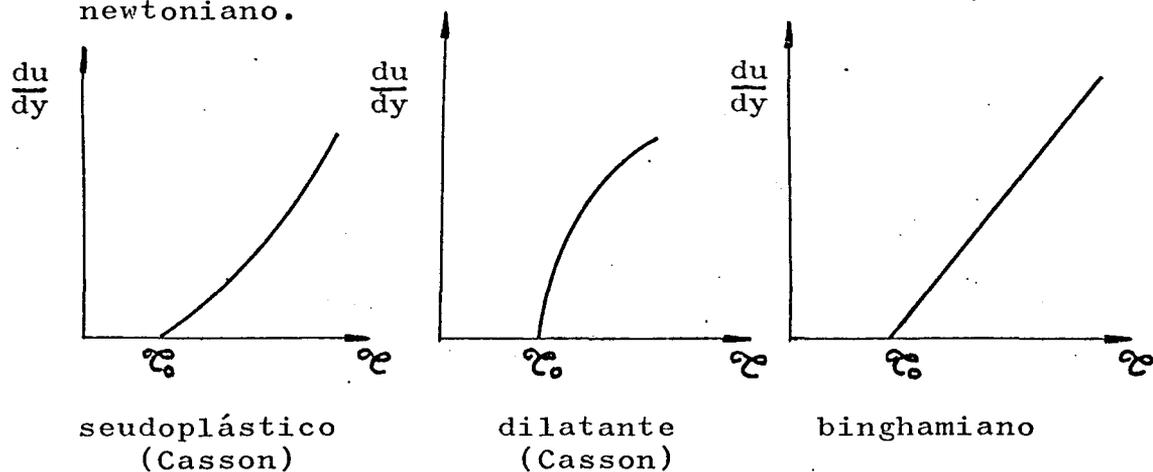


Figura 1.19.

La estructura tridimensional del fluido en reposo presenta cierta rigidez que sólo se desmorona para un valor del esfuerzo cortante igual o superior al límite de fluencia τ_0 . A partir de esta situación el cuerpo presenta un comportamiento fluido.

Se observan comportamientos plásticos en las pastas de dientes, pomadas, grasas lubricantes, cementos líquidos, chocolates, suspensiones de pigmentos, altas - concentraciones de espuma (huevo batido), tintas de imprenta, vaselinas, polvos de extinción, mayonesa, etc. y en general en las dispersiones de gran concentración.

Tendremos como representaciones comunes de - los fluidos con comportamiento plástico las de la fig. 1.20.

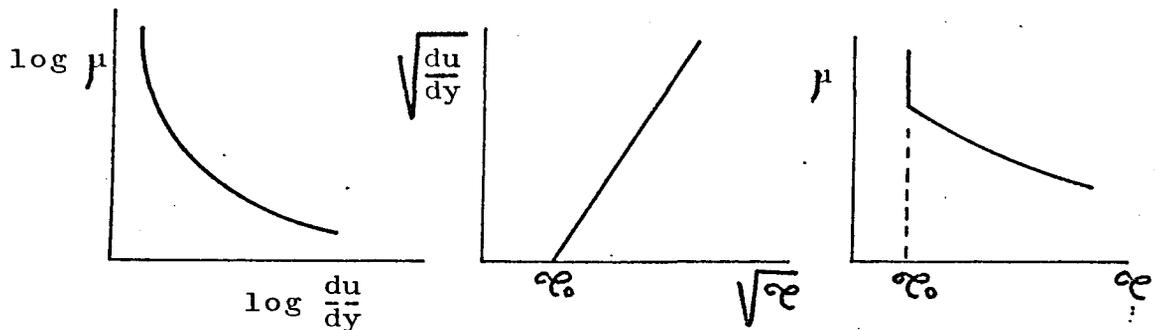


Figura 1.20.

1.4.5. - COMPORTAMIENTO TIXOTROPICO

En los anteriores modelos no se ha hablado - de las posibles evoluciones temporales de la viscosidad - diferencias, de la viscosidad aparente o del valor del - esfuerzo cortante opuesto por el fluido para un gradiente de velocidades constante, pues se supone que éstas no existen en ellos (2,3,10,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24).

Fluidos tales como las pastas de imprenta, la vaselina, la mayonesa, el yogourt, las ceras, lacas, colas, grasas y otros presentan una disminución de la viscosidad aparente al ir aumentando el tiempo durante el cual se les somete a un gradiente de velocidades constante.

El verdadero reograma de una sustancia con comportamiento tixotrópico es tridimensional y viene dado por la superficie cóncava de la figura 1.21, que es función del esfuerzo cortante, del gradiente de velocidades y del tiempo, para todas las otras condiciones constantes. Un ensayo normal para determinación del reograma sigue la evolución indicada en la fig. 1.21 y en el plano $du/dy - \tau$ se obtiene un bucle o ciclo de "histéresis", (fig. 1.22) proyección plana de la evolución tridimensional.

En general, este comportamiento se presenta en los sistemas dispersos, de estructura en forma de láminas, fibras, agujas o esferas (HOFMANN, HOUWINK). La dispersión cambia su estructura al ser cizallada, regenerándose a su vez y llegando, en el tiempo, a un equilibrio entre la estructura que se rompe y la que se regenera, para un gradiente de velocidades dado. El intervalo de tiempo para que se establezca el equilibrio decrece al aumentar el valor del gradiente de velocidades (fig. 1.23.). Es de destacar que el concepto de tixotropía se introdujo en un principio para definir la transformación de sol fluido a gel sólido, en condiciones isotérmicas, y viceversa (FREUNDLICH, 1.935).

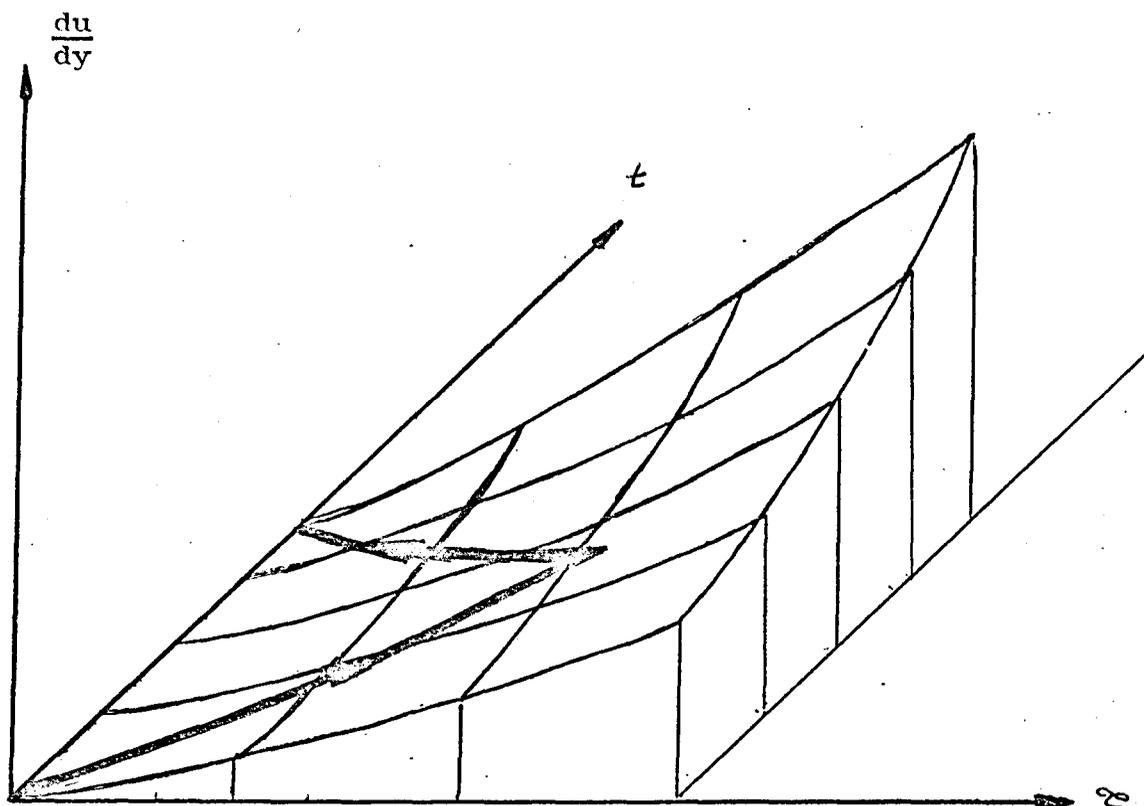


Fig. 1.21

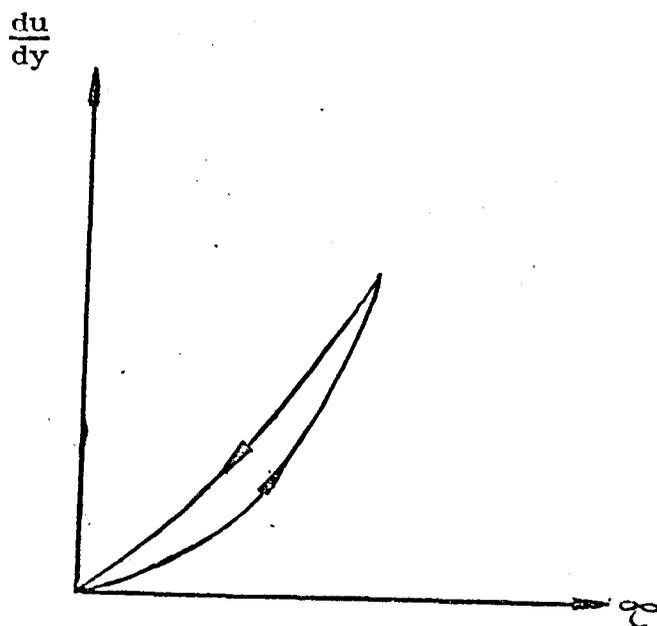


Fig. 1.22

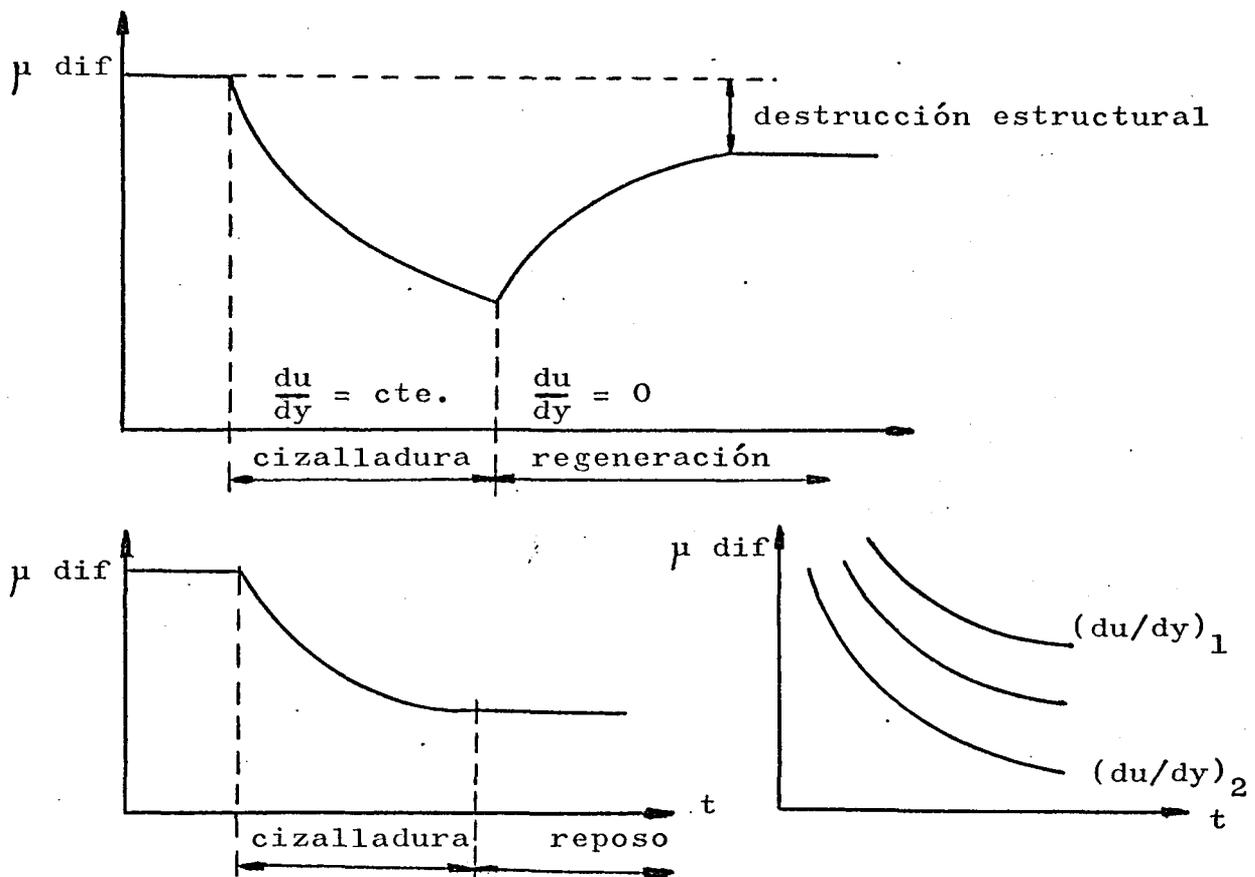


Figura 1.23.

Otro fenómeno característico es el de falsa tixotropía, que se presenta en los productos biológicos (yogourt). En ella no aparece la fase de recuperación - (fig. 1.23).

1.4.6. - COMPORTAMIENTO REOPECTICO

Contrariamente a la tixotropía, en la reope- xia la viscosidad aparente aumenta con el tiempo para un gradiente de velocidades que se mantenga constante. Se - observa en las dispersiones de dióxido de vanadio y dis-

persión acuosa de jabón.

En la fig. 1.24 se representan dos evoluciones de tipo reopéctico.

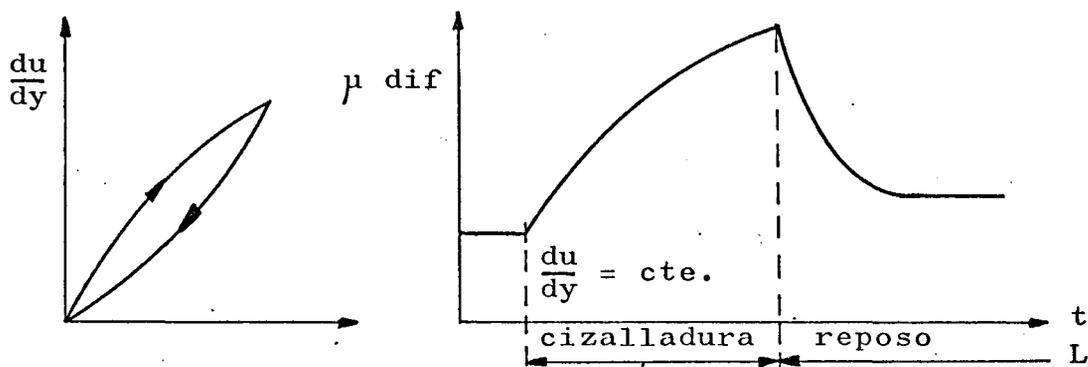


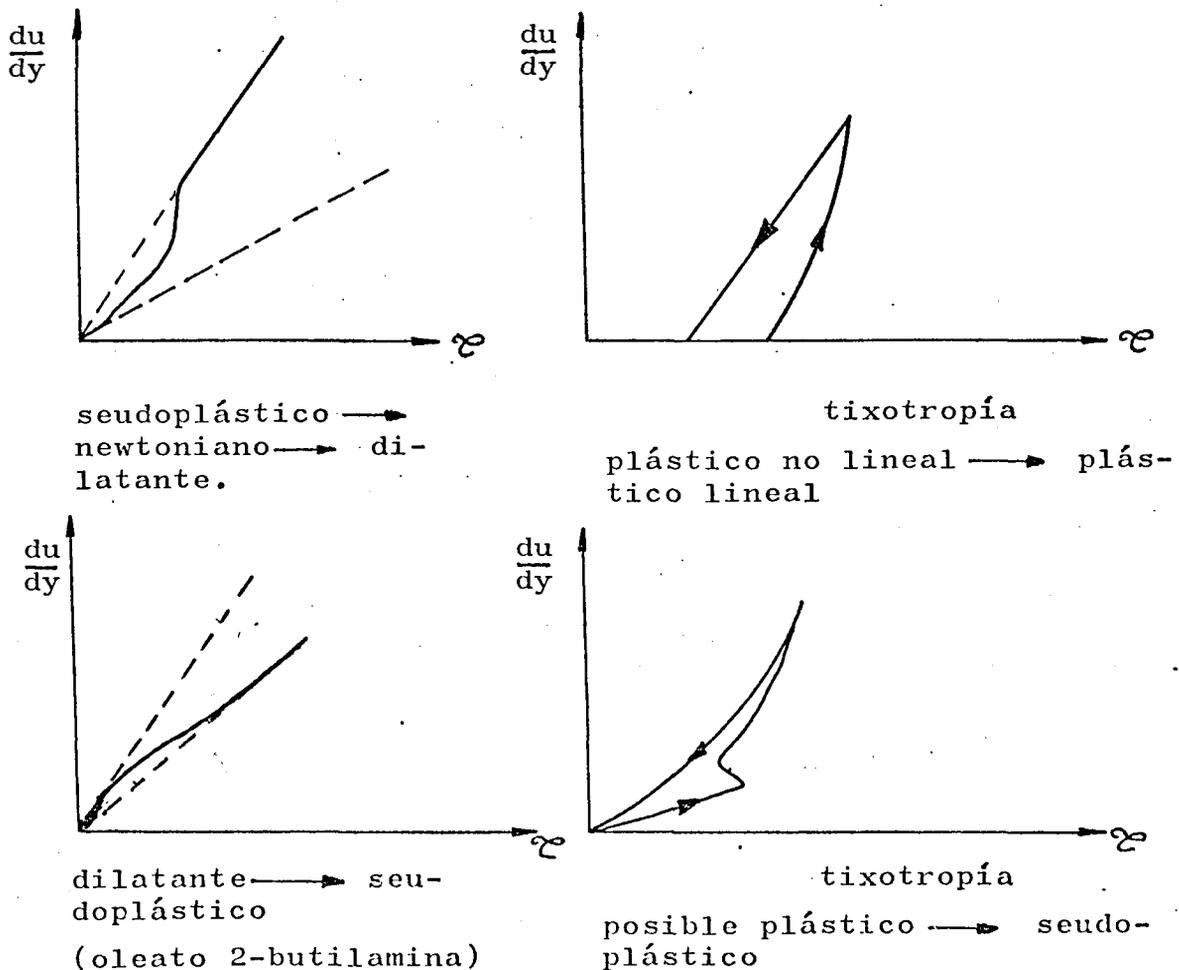
Figura 1.24.

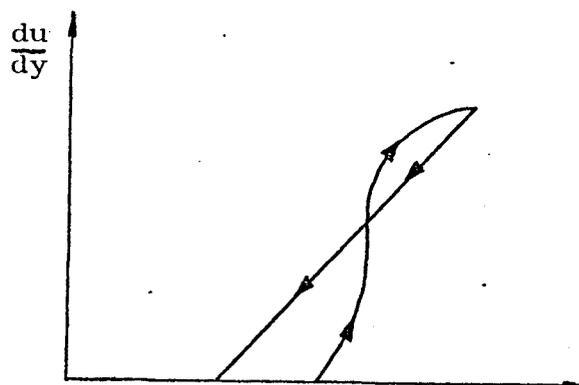
Los comportamientos tixotrópicos y reopéctico tienen mucha semejanza con los pseudoplásticos y dilatantes con tiempos de respuesta elevados. Así, en la tixotropía, el tiempo para alcanzar la ordenación de las partículas es mayor que en la pseudoplasticidad, en que se nos presenta instantánea (2,3,10,13,16,17,18,19,20,21,22,23,24).

Queremos destacar que a los conceptos de comportamiento tixotrópico y reopéctico va unido el de reversibilidad total, aunque esta condición casi nunca se cumple.

1.4.7. - COMPORTAMIENTOS MIXTOS

En la explicación de los comportamientos no newtonianos puramente viscosos anteriores hemos relacionado las variables de gradiente de velocidad, esfuerzo cortante, límite de cizalladura τ_0 y tiempo. Las funciones expuestas en los diversos comportamientos son simplificadas a modelos ideales. En realidad, las características del aparato y del método de caracterización (sensibilidad y tiempo de respuesta), la complejidad de la sustancia en estudio y el problema en particular que nos ocupa nos llevarán a situarnos en un comportamiento u otro o a localizar comportamientos complejos o mixtos de los anteriores y de los cuales representamos algunos en la fig. 1.25.





tixotropía - reopexia
plástico no lineal → plástico lineal

Figura 1.25.

Hay que saber discernir entre comportamiento de la sustancia y modificaciones introducidas por el sistema de caracterización (por ejemplo, mal termostataado) y, una vez obtenido el verdadero reograma, seleccionar el modelo de comportamiento que mejor se ajusten al problema y a la zona de trabajo de éste (2,13,24).

Para finalizar, la posibilidad de aparición de otros fenómenos de tipo físico y químico podrá afectar a la sustancia produciendo fenómenos de degradación o envejecimiento en el tiempo, que deberán tenerse en cuenta en el planteamiento y solución de todo problema de flujo y caracterización.

1.5. - MODELOS MATEMATICOS DE LOS FLUIDOS PURAMENTE VIS-
COSOS DE CARACTER SEUDOPLASTICO

En el apartado 1.2. hemos dado la forma general de la ecuación de estado reológica. Los casos más frecuentes de derrame son susceptibles de estudiarse como bidimensionales, pudiéndose reducir entonces la forma tensorial a la paramétrica que admite representación en

$$F \left(\mathcal{E}_{xy}, \frac{du}{dy} \right) = 0$$

un plano cartesiano, dando lugar al reograma.

El apartado 1.3. nos daba algunas de las expresiones de $\mathcal{E}(X^2)$, expresiones que sirven para representar algunos reogramas reales. Otras formas de representación han sido elaboradas, ya partiendo del ajuste del reograma a ciertas funciones analíticas, ya encontrando la función reológica por consideraciones teóricas basadas en las teorías de EYRING sobre comportamiento cinético-viscoso.

El concepto de viscosidad ha trascendido a los fluidos no newtonianos en forma de viscosidad aparente y viscosidad diferencial (apartado 1.4.2.) o sus correspondientes inversos bajo el nombre de fluidez. El hecho de que estos conceptos se sigan empleando obliga a la presentación de la función reológica en la forma :

$$\mathcal{E} = f \left(\frac{du}{dy} \right) \frac{du}{dy}$$

siendo entonces $f\left(\frac{du}{dy}\right)$ la viscosidad aparente.

A continuación, desarrollamos una breve exposición de los modelos más conocidos.

1.5.1. - MODELOS TEORICOS

La teoría cinética molecular ha sido aplicada al concepto de viscosidad por EYRING y otros, evaluando ésta a partir de otras propiedades físicas de la materia (8,22) y, a nivel molecular, de la forma, el tamaño y la interacción molecular (23).

El movimiento vibratorio de la molécula está limitado. Este límite se representa por un cierto potencial de energía libre molecular de activación en reposo del fluido. Estadísticamente, las moléculas dejan su posición de equilibrio saltando la barrera de potencial y creando un vacío que podrá ser ocupado por otra. La frecuencia de abandono de una posición es una propiedad isotrópica, función de la constante de BOLTZMANN, de la de PLANCK, de la de los gases perfectos, del N°. de AVOGADRO y de la temperatura absoluta y de la energía libre de activación en reposo.

Al iniciarse el derrame en el fluido, la frecuencia (f) deja de ser isotrópica, pues se supone que la barrera de potencial se distorsiona.

La aplicación de un esfuerzo cortante hace que los saltos en el sentido de la cortadura reciban una energía suplementaria debida a la acción del mismo esfuerzo cortante (o, lo que es equivalente :es más fácil saltar la barrera de potencial en este sentido, ya que ésta se reduce en la energía aportada por el movimiento al introducir el esfuerzo cortante).

Se puede determinar la velocidad relativa de las moléculas de una capa respecto de otra inmediata a partir de las frecuencias de abandono modificada. De esta velocidad, se puede inferir del perfil de velocidades entre dos capas, llegándose a la expresión de PRANDTL - EYRING

$$\tau = A \operatorname{Arg. sh.} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right)$$

siendo A y B constantes reológicas, funciones de la temperatura; en realidad, de las anteriores constantes citadas, de la dimensión de la celda que encierra la molécula, de la distancia entre capas inmediatas de moléculas, del volumen molecular y de la temperatura, siendo todos, excepto la temperatura, constantes para un fluido dado.

Se pueden desarrollar otros modelos, como el de POWEL - EYRING

$$\tau = C \frac{du}{dy} + A \operatorname{arg. sh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right)$$

o de SALT-RYAN-CHRISTIANSEN, que emplea tres parámetros A, B y C.

Esta teoría, en principio, fue aplicada a los fluidos newtonianos, siéndolo también a los no newtonianos, tales como las soluciones macromoleculares.

Refiriendo los cálculos a un mol y ligando la energía de potencial a la interna de vaporización molar se llega, tras simplificaciones, a

$$\mu = M \exp (N/T)$$

en que M y N son constantes resultantes de las anteriores para el caso newtoniano y análogas a la de ARRENIUS

$$\mu = p \exp (Q/T)$$

donde P está relacionada con la energía de activación y N con la potencial. Nótese que la viscosidad crece con el inverso de la temperatura, tal y como se observa en los líquidos.

En el cuadro II se presenta una recopilación de los modelos matemáticos experimentales y teóricos de los fluidos puramente viscosos de comportamiento pseudo-plástico. Se ha incluido los modelos de comportamiento plástico por considerarse que ambos son idénticos, excepto la diferente magnitud del umbral o límite de fluencia.

Se puede apreciar el gran número de modelos empíricos frente a los teóricos. Esto se debe al origen experimental, ajuste de reogramas particulares, de los modelos empíricos, a la utilización por éstos de conceptos análogos a la viscosidad newtoniana y a una mayor simplicidad analítica. Pasamos a describir algunas particularidades de los modelos experimentales.

denominación -AUTOR-	FUNCION REOLOGICA	VISCOSIDAD APARENTE	VISCOSIDAD DIFERENCIAL	Nº DE PAR.
PRANDTL EYRING	$\tau = A \arg \operatorname{sh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right)$	$A \arg \operatorname{sh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right) \frac{du}{dy}$	$\frac{A}{B \sqrt{1 + \left(\frac{du}{dy} \right)^2}}$	2 A, B
POWELL EYRING	$\tau = C \frac{du}{dy} + A \arg \operatorname{sh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right)$	$C + A \arg \operatorname{sh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right) \frac{du}{dy}$	$C + \frac{A}{B \sqrt{1 + \left(\frac{du}{dy} \right)^2}}$	3 A, B, C
SUTTERBY	$\tau = M_0 \left[\arg \operatorname{sh} \left(N \frac{du}{dy} \right) \right]^p \frac{du}{dy}$ $0 < p < 1$	$M_0 \left[\arg \operatorname{sh} \left(N \frac{du}{dy} \right) \right]^p \frac{du}{dy}$		3 M, N, P
PRANDTL	$\tau = A \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{du}{dy} \frac{C}{A} \right)$			2 A, C
EYRING	$\tau = \frac{du}{dy} + C \operatorname{sen} \left(\frac{\tau}{A} \right)$			3 A, B, C

MODELOS EXPERIMENTALES

denominación -AUTOR-	FUNCION REOLOGICA	VISCOSIDAD APARENTE	VISCOSIDAD DIFERENCIAL	Nº DE PAR.
NEWTON	$\tau = \mu \frac{du}{dy}$	μ	μ	1- μ
BINGHAM	$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy}$	μ	μ	2- τ_0, μ
CASSON	$\tau = \tau_0^{1/2} + \mu_c \left(\frac{du}{dy} \right)^{1/2}$	μ_c^2	μ_c^2	2- τ_0, μ_c
CASSON - GENERALIZADA Nº 1	$\tau = \tau_0^{1/n} + \mu_c \left(\frac{du}{dy} \right)^{1/n}$ $n > 1$			4- τ_0, μ_c, n
CASSON - GENERALIZADA Nº 2	$\tau = \tau_0^{2/n} + \mu_c \left(\frac{du}{dy} \right)^{2/n}$ $n > 2$			4- τ_0, μ_c, n
CASSON - GENERALIZADA Nº 3 MODIFICADO	$\tau = \sqrt{\tau_0^2 + \mu_c^2} \sqrt{\frac{\mu_{ap} \cdot du}{\mu_{ap_0} \cdot dy}}$ μ_{ap} fase continua μ_{ap_0} fase extrapolada	$\mu_c^2 \frac{\mu_{ap}}{\mu_{ap_0}}$		4- $\tau_0, \mu_c, \mu_{ap}, \mu_{ap_0}$
HERSCHEL-BULKEY Nº 1	$\tau = \tau_0 + \left(\mu \frac{du}{dy} \right)^{1/m}$	$\mu^{1/m} \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^{1-m}$		3- τ_0, μ, m
HERSCHEL-BULKEY Nº 2	$\tau = \tau_0 + \frac{\mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n}{1 + C \left(\frac{du}{dy} \right)^n}$	$\frac{\mu}{1 + C \left(\frac{du}{dy} \right)^n}$		4- τ_0, μ, C, n
OSTWALD - DE WAELE-NUTTIN	$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n$ $0 < n < 1$	$K \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$	$K \cdot n \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$	2-K, n
ELLIS - DE HAVEN	$\tau = \frac{\mu_0}{1 + C \tau^{n-1}} \cdot \frac{du}{dy}$ $n > 1$	$\frac{\mu_0}{1 + C \tau^{n-1}}$	$\frac{\mu_0}{1 + C n \tau^{n-1}}$	3- μ_0, C, n
STEIGER - ORY	$\tau = \frac{1}{A^2 + C} \cdot \frac{du}{dy}$ $C > 0$	$\frac{1}{A^2 + C}$	$\frac{1}{3A^2 + C}$	2-A, C
SISCO	$\tau = A \cdot \frac{du}{dy} + B \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^n$ $0 < n < 1$	$A + B \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$	$A + B \cdot n \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$	3 - A, B, n
FERRYS	$\tau = \frac{\mu}{1 + \frac{\tau}{G}} \cdot \frac{du}{dy}$			2- μ, G
REINER - PHILIPPOFF	$\tau = \left[\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + \left(\frac{\tau}{A} \right)^2} \right] \frac{du}{dy}$ El exponente 2 se Generaliza a n	$\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + \left(\frac{\tau}{A} \right)^2}$	$\frac{d\tau}{dy} = \left[1 + \left(\frac{\tau}{A} \right)^2 \right] \frac{d\mu}{dy}$	3- μ_∞, μ_0, A
REINER	$\tau = \frac{1}{\mu_\infty} \left(\frac{1}{1 + \frac{\tau}{\mu_\infty}} \right) e^{\frac{\tau}{\mu_\infty}}$	$\frac{1}{\mu_\infty} \left(\frac{1}{1 + \frac{\tau}{\mu_\infty}} \right) e^{\frac{\tau}{\mu_\infty}}$		3- μ_∞, μ_0, τ
WILLIAMSON	$\tau = \frac{A}{B + \frac{du}{dy}} + \mu_0 \frac{du}{dy}$	$\frac{A}{B + \frac{du}{dy}} + \mu_0$		3-A, B, μ_0
BRIANT	$\tau = \mu_\infty \left[1 + \frac{\tau_0}{n \cdot \mu_\infty} \left(\frac{du}{dy} \right)^n \right]$ $0 < n < 1$	$\mu_\infty \left[1 + \frac{\tau_0}{n \cdot \mu_\infty} \left(\frac{du}{dy} \right)^n \right]$		3- μ_∞, τ_0, n
BELLET Nº 1	$\tau = \left[\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + C \tau^{n-1}} \right] \frac{du}{dy}$ $n > 1$	$\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + C \tau^{n-1}}$		4- μ_∞, μ_0, n, C
BELLET Nº 2	$\tau = \frac{\mu_\infty B \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} + \mu_\infty \frac{du}{dy}}{1 + B \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}}$ $n > 1$	$\frac{\mu_\infty B \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} + \mu_\infty}{1 + B \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}}$		3- μ_∞, B, n

1.5.2. - MODELOS EXPERIMENTALES

Se han propuesto diversas clasificaciones de estos modelos, tales como la de forma de la función matemática que los define, el número de parámetros característicos que intervienen, el paso de modelos más generales a particulares, etc.

Con el ánimo de aunar estas clasificaciones, en el cuadro II se presentan ordenadamente los modelos - partiendo del de NEWTON (el caso más simple), pasando - por los plásticos lineales y no lineales (BINGHAM, CASSON, HERSHEL, BULKEY), por los pseudoplásticos (OSTWALD, DE WAELE, NUTTIN). El grupo de ELLIS - DE HAVEN - STEIGER - - ORY - SISKO y el de REINER - PHILIPPOFF, BELLET n.º. 1 y el de WILLIAMSON, BRIANT y BELLET n.º. 2 serían grupos de funciones reológicas análogas con diferentes grados de - complejidad. Se da la expresión de la viscosidad aparente y de la diferencial en algunos casos y el número de - parámetros que intervienen en cada modelo.

A continuación destacamos algunas peculiaridades de las funciones o modelos empleados más frecuentemente.

1.5.2.1. - LEY DE POTENCIA O DE OSTWALD

La forma $\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n$; $n > 1$ viene definida por dos parámetros; K índice de consistencia, n índice de comportamiento no newtoniano, de linealidad, de - pseudoplasticidad o de comportamiento al flujo. Es el mínimo número de parámetros que se pueden utilizar para de

finir un comportamiento pseudoplástico, dependiendo de la temperatura, concentración, viscosidad del solvente (8, 14).

El modelo admite linearización por representación logarítmica

$$\log. \tau = \log. K + n \lg \frac{du}{dy}$$

lo que permite una fácil utilización y determinación de los parámetros K y n gráficamente. Su utilización se recomienda para valores del gradiente de velocidades no próximos al origen donde se encuentra que K tiende a cero (14). La expresión da un buen ajuste cuando el gradiente de velocidades varía varios órdenes de magnitud.

La utilización de sólo dos parámetros, K y n, no introduce gran complejidad en el desarrollo de la Mecánica de Fluidos clásica, lo que ha contribuido a su utilización más generalizada, ya que representa una precisión suficiente para la industria.

Como inconvenientes de este modelo, encontramos la falta de una justificación física que los defienda y la variabilidad de las dimensiones de K, ya que dependen de n y ambos varían.

THIRRIOT (4) da una modificación a la ley de OSTWALD presentándola de la siguiente manera :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \left| T^* \frac{du}{dy} \right|^{-N}$$

siendo $K = \mu^* T^{* -N}$; $N = 1-n$, en que μ^* tiene las dimensiones de una viscosidad y T^* las de un tiempo, y que da solución a los problemas dimensionales de la ley de OSTWALD.

Se han hecho intentos para llegar a las formas análogas de la ley de OSTWALD basándose en supuestos físicos (8) y así, partiendo de la hipótesis de que son proporcionales el número de las uniones entre moléculas y los esfuerzos cortantes y de que el número de estas uniones moleculares que subsisten a un cierto gradiente de velocidades son función de éste, es decir

$$- \frac{dN}{d\tau} = \frac{a}{\tau} \quad \text{y} \quad \frac{dN}{d\left(\frac{du}{dy}\right)} = \frac{b}{\frac{du}{dy}}$$

tendremos, que para la unidad de volumen los encajes entre moléculas serán

$$\frac{d\left(\frac{du}{dy}\right)}{d\tau} = \frac{a}{b} \frac{\frac{du}{dy}}{\tau}$$

o sea

$$\lg\left(\frac{du}{dy}\right) = \frac{a}{b} \lg \tau + C$$

forma logarítmica de la ley de OSTWALD.

Esta justificación carece de rigor físico, aunque es suficiente para que, añadida a las otras ventajas del modelo, permita su utilización, tan generalizada ya hoy, en las aplicaciones tecnológicas.

1.5.2.2. - MODELO DE ELLIS Y DERIVADOS

Para eliminar la imprecisión de la ley de OSTWALD, ELLIS añadió al modelo pseudoplástico uno newtoniano, obteniendo

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu_0} \tau + \frac{c}{\mu_0} \tau^n$$

lo que permite un ajuste correcto de los reogramas para bajos valores del gradiente de velocidades.

De forma análoga, SISKÓ descompone en newtoniano, y pseudoplástico

$$\tau = A \frac{du}{dy} + B \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

Para valores altos y medios del gradiente de velocidades, su comportamiento es bueno, no siéndolo para valores bajos. Su campo de aplicación se sitúa entre los gradientes de 1 s.^{-1} y 20.000 s.^{-1} , caso de lubricantes y grasas (15,25).

Un modelo derivado más simple es el de STEIGER-ORY

$$\frac{du}{dy} = A \tau^3 + C \cdot \tau$$

que presenta un buen comportamiento para valores medios y bajos del gradiente de velocidades.

El modelo de ELLIS precisa la obtención de tres valores experimentales, que dan tres puntos del reograma, es decir tres ecuaciones, y permiten obtener los parámetros. No admite la linearización logarítmica del modelo de OSTWALD, aunque sí un tratamiento análogo para la fluidez diferencias, es decir, derivando

$$\frac{du}{dy} = D = \frac{1}{\mu_0} \tau + \frac{C}{u_0} \tau^n$$

$$\frac{dD}{d\tau} = \frac{1}{\mu_0} + \frac{C}{\mu_0} n \tau^{n-1}$$

entonces, si τ tiende a 0, $\frac{dD}{d\tau}$ tiende al valor $\frac{1}{\mu_0}$ (fig. 1.26.).

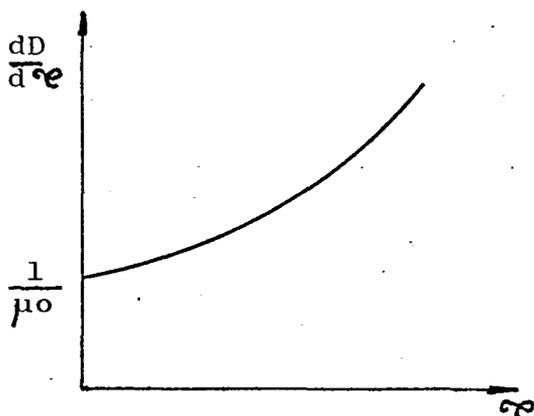


Figura 1.26

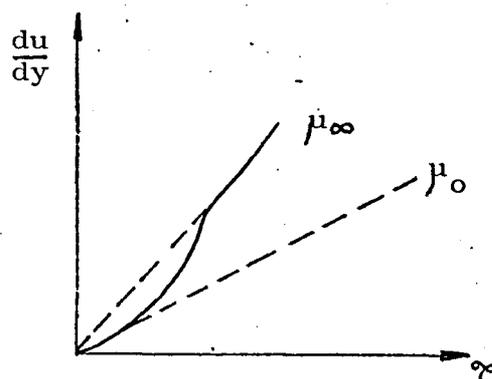


Figura 1.27.

Obtenido μ_0 , se puede escribir :

$$\lg \left(\frac{dD}{d\tau} - \frac{1}{\mu_0} \right) = \lg \frac{C}{\mu_0} + (n-1) \lg \tau + \lg n$$

De la representación en coordenadas logarítmicas, se obtiene el valor de n y, conocido éste, el de C . Otros modelos matemáticos más potentes pueden emplearse para el ajuste.

Se recomienda (14) el empleo de esta ley para valores bajos del gradiente de velocidades (soluciones de polímeros). Es de destacar que el comportamiento de -

ELLIS, primero newtoniano y luego pseudoplástico, es análogo al teórico propuesto por EYRING.

1.5.2.3. - MODELO DE REINER

El modelo de REINER-PHILIPPOFF completa el de OSTWALD, dando un correcto ajuste para valores bajos y elevados del gradiente de velocidades, donde precisamente suele mostrarse un comportamiento newtoniano (15, 24, 25):

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau}{\mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + \left(\frac{\tau}{A}\right)^n}}$$

la parte pseudoplástica del reograma no queda bien caracterizada (8).

Se ha empleado este modelo en polímetros fundidos y disueltos, en caolín en suspensión, en caucho disuelto en tolueno y, en general, para dispersiones y soluciones coloidales.

1.5.2.4. - MODELO DE BINGHAM Y ANALOGOS

El plástico de BINGHAM es el de comportamiento no newtoniano más simple, a un tiempo con carácter plástico y newtoniano. El comportamiento real suele ser más complejo, por lo que se utilizan otros modelos. CASSON introduce el comportamiento pseudoplástico a partir de un cierto umbral y límite de fluencia (plásticos no lineales).

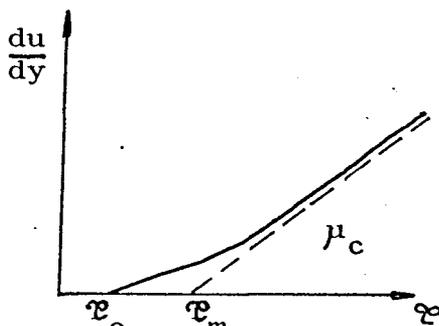


Figura 1.28.

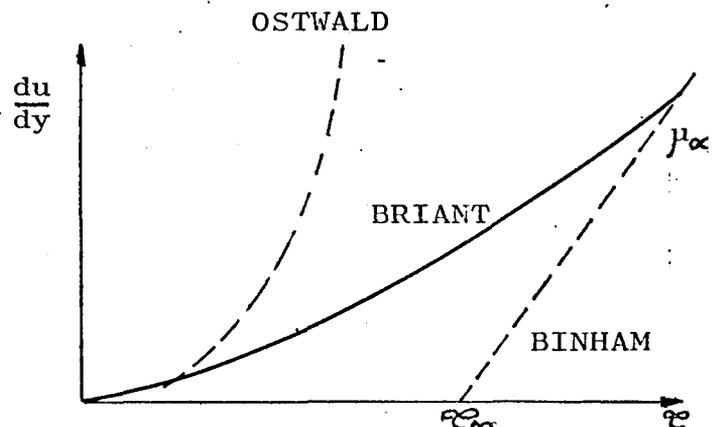


Figura 1.29.

En las diversas modalidades del plástico de CASSON aparecen como parámetros el umbral de fluencia y la viscosidad plástica.

Las potencias que introducen el carácter pseudoplástico pueden ser dos o una, m y n , y toman valores constantes o variables (9,13,25). El modelo modificado para dispersiones en fluidos pseudoplásticos introduce conceptos como la viscosidad aparente de la fase continua μ_p y la viscosidad plástica de la fase continua $\mu_{ap\infty}$ o extrapolada. El modelo es complejo y con demasiados parámetros.

WILLIAMSON Y BRIANT proponen modelos asintóticos al de BINGHAM. Así, BRIANT

$$\tau = \mu_{\infty} \frac{du}{dy} \left(1 + \frac{\tau_{\infty}}{n \mu_{\infty} \frac{du}{dy}} \right)^n$$

siendo n el índice de pseudoplasticidad y μ_{∞} y τ_{∞} parámetros plásticos extrapolados.

Esta expresión admite la representación :

$$\tau^* = D^* \frac{1-n}{1+D^*} (1 + D^*)^n$$

$$\text{siendo } D^* = \frac{n \mu_{\infty}}{\tau_{\infty}} \frac{du}{dy} ; \quad \tau^* = \frac{n \tau}{\tau_0}$$

forma más simplificada en el número de parámetros.

Otros modelos más complejos y de aplicaciones particulares son expuestos en el cuadro II, en que se encuentran explicitados en la forma

$$\tau = f_1 \left(\frac{du}{dy} \right) \quad \text{o en la forma} \quad \frac{du}{dy} = f_2 (\tau)$$

por si interesa conocer el perfil de velocidades.

1.6. - AJUSTE DE LAS FUNCIONES REOLOGICAS.

En general, la función que da el comportamiento físico de un fluido no es conocida. Todas las funciones reológicas expuestas son aproximaciones que proponen distintos autores y de las cuales ya hemos indicado, en algún caso, el campo de aplicación. A esta aproximación

de la función empleada se han de añadir los errores de tipo experimental, que trataremos en la parte de caracterización de los fluidos, centrándose ahora en la aproximación de cierta función a una nube de puntos que representa un fenómeno real (despreciados los errores de medida para obtener la nube de puntos).

Para dar una forma analítica a los resultados experimentales, el primer problema que se nos presenta es la elección de la función o ley a ajustar. En nuestro caso, la elección ha sido hecha a través de la bibliografía que en el terreno de la Reología existe y luego de un estudio comparativo sobre casos reales.

Los modelos seleccionados han sido los de OSTWALD, STEIGER-ORY y ELLIS. Los dos primeros emplean sólo dos parámetros reológicos y el tercero, tres, siendo el más frecuente en la literatura el de OSTWALD. Según la forma que presente el reograma puede llevarnos a la elección de otros modelos.

La linearización del modelo introduce rapidez en el cálculo de los parámetros o coeficientes característicos de la función en el desarrollo del ajuste.

En particular, la linealización polinomial de incrementos, propuesta para los modelos de ELLIS Y SISKO, es dificultosa de aplicación, pues se desconoce el valor de n y se ha de proceder por tanteos sucesivos.

El ajuste podrá realizarse manualmente y - por cálculo en máquinas automáticas.

Partiendo de la nube de puntos (m medidas - que establecen la correspondencia entre las variables x e y), se requiere la elección de unos criterios de ajuste para encontrar la curva que esté a la mínima distancia de la nube.

Los criterios se basan en la dependencia del fenómeno y de una sola variable x , es decir que la ley - sea : $y = f(x)$. Esta función deberá ser definida y continua en todo el dominio experimentado.

Se supone que el valor de la variable x_i es conocido con toda exactitud y que la precisión de medida de las y_i es constante y acotada superiormente.

El criterio empleado es el de obtener la mínima suma de los cuadrados de los valores de la diferencia de ordenadas ajuste-experimental o método de los mínimos cuadrados. El método permite, tomando exponentes - diferentes de dos, de la diferencia de ordenadas. Si el exponente tiende a infinito, tendrá más peso la mayor - distancia en todo el cálculo, lo que equivale a limitar la distancia máxima.

1.6.1. - METODO DE LOS MINIMOS CUADRADOS.

APLICACION

No entraremos en detalles de la teoría y desarrollo del método, tales como : su interpretación estadística, errores tipos de estimación, seguridad de los coeficientes de correlación, desarrollo matricial, errores de los parámetros y la ponderación funcional, que se pueden obtener en obras especializadas (2,3,26,27). Retendremos el interés de utilizar el máximo número de datos experimentales posibles y la posibilidad de ponderación funcional.

Suponiendo que pretendemos ajustar una nube de n puntos a una función de dos parámetros

$$y = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x)$$

la distancia cuadrática tendrá una expresión :

$$d^2 = \sum_{i=1}^n \left[a_1 f_1(x_i) + a_2 f_2(x_i) - y_i \right]^2$$

que podemos escribir :

$$d^2 = (a_1, a_2, -1) \begin{pmatrix} F_1 \cdot F_1 & F_1 \cdot F_2 & F_1 \cdot Y \\ F_2 \cdot F_1 & F_2 \cdot F_2 & F_2 \cdot Y \\ Y \cdot F_1 & Y \cdot F_2 & Y \cdot Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

con : $F_j = \left| \begin{matrix} f_i(x_i) \\ j \end{matrix} \right|_1^n$, $Y = \left| \begin{matrix} y_i \\ 1 \end{matrix} \right|_1^n$ tomando j los valores 1 y 2.

Si desarrollamos como formas cuadráticas y derivamos parcialmente respecto a a_1 y a_2 , e igualamos a 0, es decir, minimizamos la distancia cuadrática, obtenemos las ecuaciones del producto :

$$\begin{pmatrix} F_1 \cdot F_1 & F_1 \cdot F_2 \\ F_1 \cdot F_2 & F_2 \cdot F_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \cdot Y \\ F_2 \cdot Y \end{pmatrix}$$

que, generalizando al caso de S funciones :

$$y = a_1 (f_1(x)) + a_2 f_2(x) + \dots + a_s f_s(x)$$

$$\text{da el sistema : } \tilde{A}_{jk} \cdot \tilde{a}_j = \tilde{B}_j$$

$$\text{con } A_{jk} = \sum_{i=1}^n f_j(x_i) f_k(x_i)$$

$$a_j = a_j$$

$$B_j = \sum_{i=1}^n f_j(x_i) Y_i \quad \text{variando } j \text{ y } k \text{ de } 1 \text{ a } s.$$

La resolución del sistema nos permite determinar los coeficientes a_1, a_2, \dots, a_s , soluciones del ajuste, conocidas las funciones, según el criterio de los mínimos cuadrados.

Para un ajuste lineal $y = f(x) = a + b(x)$ el número de funciones es $s = 2$, siendo éstos :

$$f_1(x) = 1 \quad f_2(x) = x$$

En caso que este ajuste lineal corresponda a la ley de NEWTON tendremos : $y = \mu$, $x = \frac{du}{dy}$ y $b = \mu$ -

el número de funciones es $S = 1$ y $f_1(x) = x$, dando :

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot a = \sum x_i \cdot y_i$$

Tal como operamos $\varphi = y$, estamos minimizando la distancia según los esfuerzos cortantes, es decir, su ponemos que en ellos están los errores. Si fuera al revés que los errores afectaran al gradiente de velocidades de forma considerable respecto a los de esfuerzo cortante, sólo se requiere hacer el cambio $x = \varphi$ e $y = \frac{du}{dy}$ operando de igual forma.

La ley de OSTWALD puede linealizarse pasando a logaritmos. El ajuste lineal se presenta con :

$$f_1(x) = 1 \quad ; \quad f_2(x) = \log \left(\frac{du}{dy} \right) \quad ; \quad x_i = \log \left(\frac{du_i}{dy} \right) \quad ;$$

$$y_i = \log (\varphi_i)$$

Se obtiene así la función óptima en representación logarítmica. Las distancias relativas reales son susceptibles de minimización, introduciendo distorsiones o ponderaciones en los puntos de ordenada pequeña.

El ajuste a una ley de STEIGER-ORY es de carácter polinomial, y da en este caso :

$$f_1(x) = x \quad ; \quad f_2(x) = x^3$$

El modelo de ELLIS emplea las funciones :

$$f_1(x) = x \quad ; \quad f_2(x) = x^n$$

no se puede resolver directamente por ser n un parámetro desconocido a determinar. El proceso iterativo de asignación de un valor a n , realización del ajuste y determinación a y y b , que permiten, a su vez, hallar n con un ajuste de la función :

$$\frac{y - a x}{b} = x^n$$

que, linealizada,

$$y = \log \left(\frac{y - a x}{b} \right) \quad ; \quad f_1(x) = \log(x)$$

nos da un valor de n que difiere del asignado en cierta cantidad que, de ser inferior al error de cálculo que nos permitimos, finalizará el proceso iterativo, y lo continuará en caso contrario.

Para el modelo de ELLIS también resulta de fácil aplicación la resolución del sistema de ecuaciones:

$$\frac{\delta V}{\delta a} = 0 \quad ; \quad \frac{\delta V}{\delta b} = 0 \quad ; \quad \frac{\delta V}{\delta n} = 0$$

$$\text{siendo } V = \sum_i^n (y_i - ax_i - bx_i^n)^2$$

1.6.2. - RESULTADOS

Siguiendo el procedimiento anterior se han ajustado reogramas, en bruto, de diversos fluidos y obtenidos con un reoviscosímetro cono-plato FERRANTI (Ver Apéndice I).

Las sustancias estudiadas han sido : aceite lubricante SAE-20 AX de comportamiento newtoniano; disoluciones en agua de CMC (Carboximetilcelulosa), de carácter pseudoplástico, y de C.S.A., de carácter pseudoplástico con tixotropía (se ha distinguido el reograma de subida y de bajada).

En el cuadro IV se dan los errores cuadráticos medios obtenidos en los ajustes de tres reogramas. - Es de destacar la disminución del error cuadrático medio en el ajuste de una ley de OSTWALD cuando se aumenta el valor de la ordenada experimental mínima, es decir, no contabilizamos, en el ajuste, los valores más bajos del gradiente de velocidades.

La ley de STEIGER-ORY presenta en casi todas las situaciones el mejor ajuste, aunque no se diferencia en mucho el error cuadrático medio del obtenido para OSTWALD con un umbral inferior de 0,5 sobre 200 de escala de gradientes de velocidad.

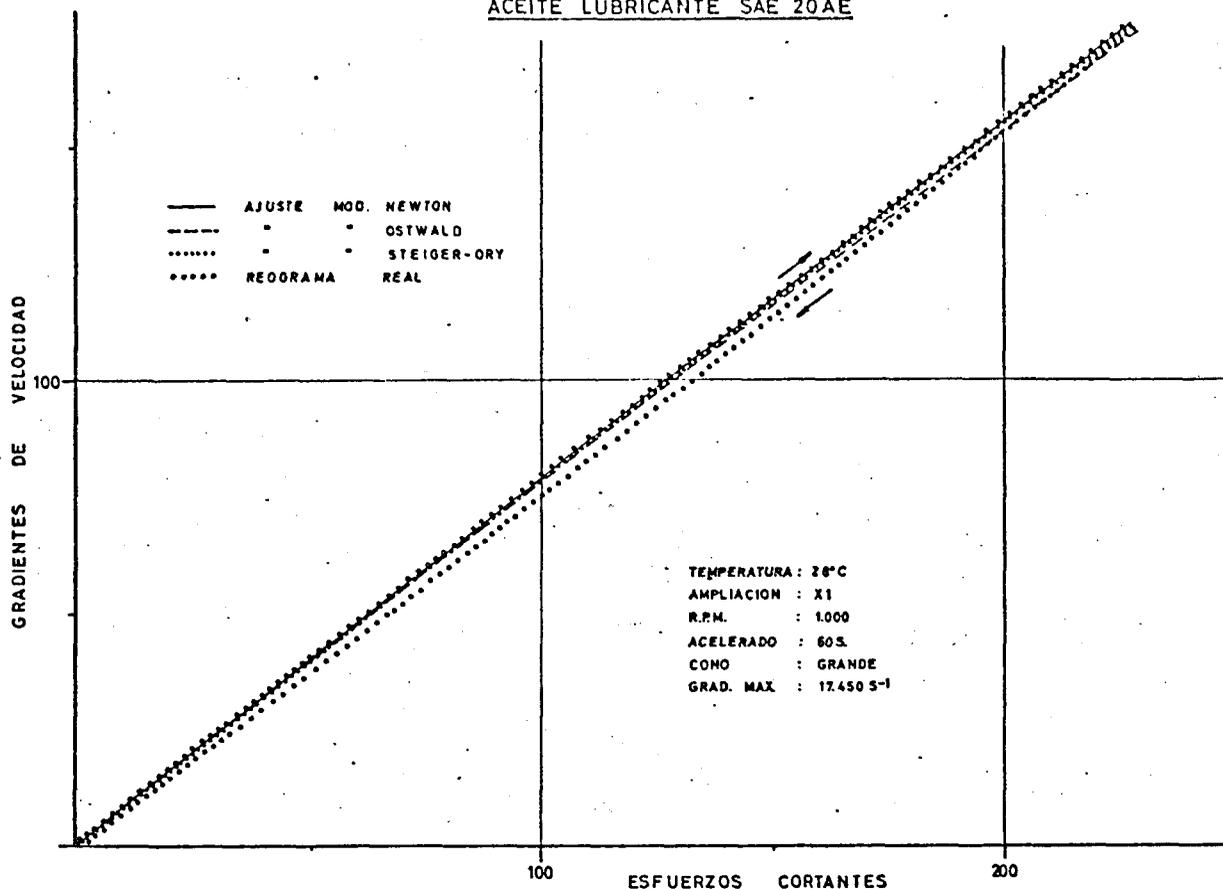
Aunque la ley de ELLYS da en algún caso un error cuadrático menor a los anteriores, el método de cálculo no se muestra lo suficiente potente como para asegurárnoslo en todas las situaciones.

Entonces, el buen funcionamiento de la ley de OSTWALD, mejorable con la ponderación de los gradientes bajos, se muestra en las figuras 1.31, 1.32 y 1.33, donde se representan los reogramas reales y los obtenidos a través del ajuste para diversos fluidos: fluido newtoniano, fluido pseudoplástico, fluido pseudoplástico con tixotropía.

-AJUSTE REOGRAMA-

ACEITE LUBRICANTE SAE 20AE

Fig.



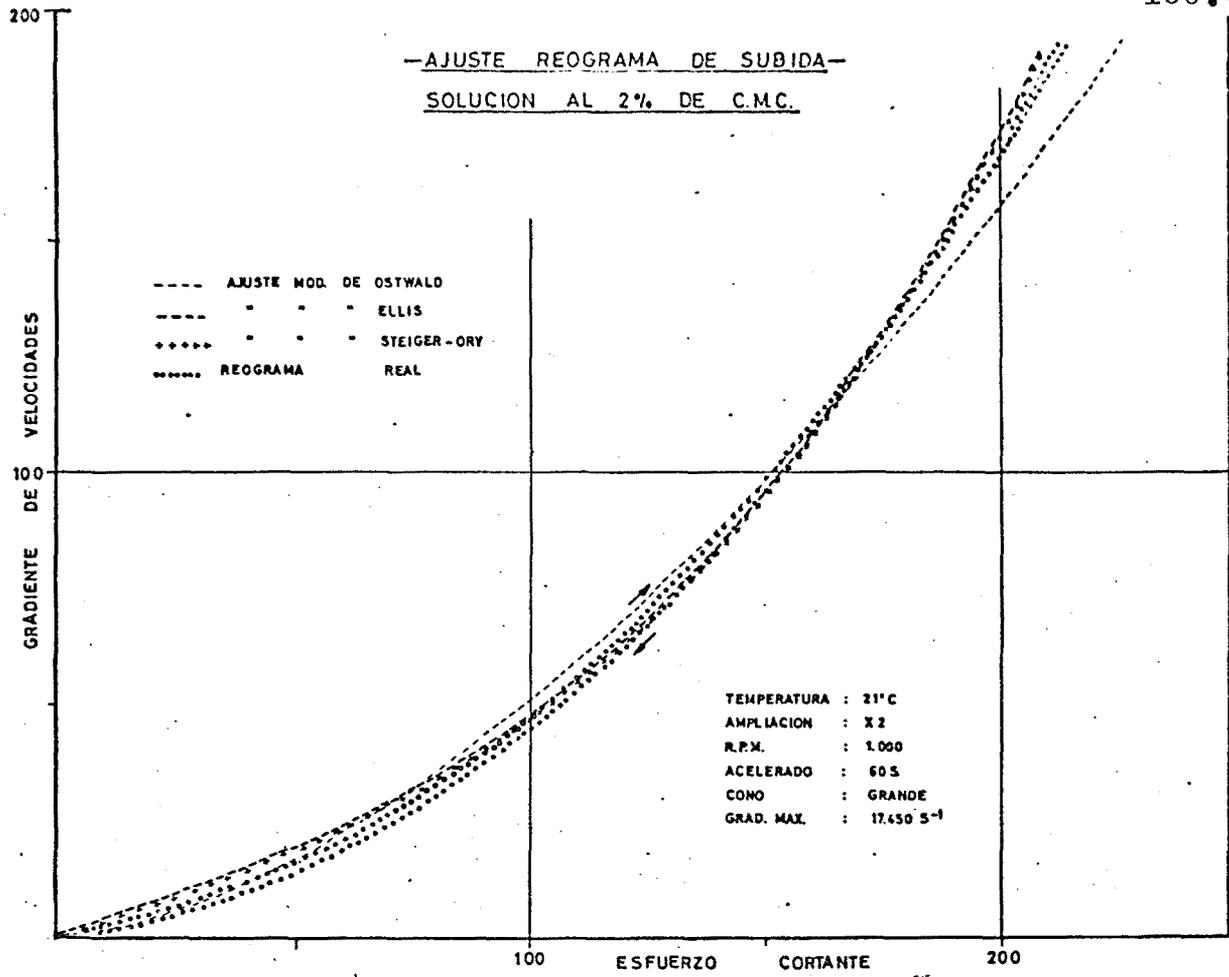
CUADRO IV

AJUSTE DE FUNCIONES REOLOGICAS

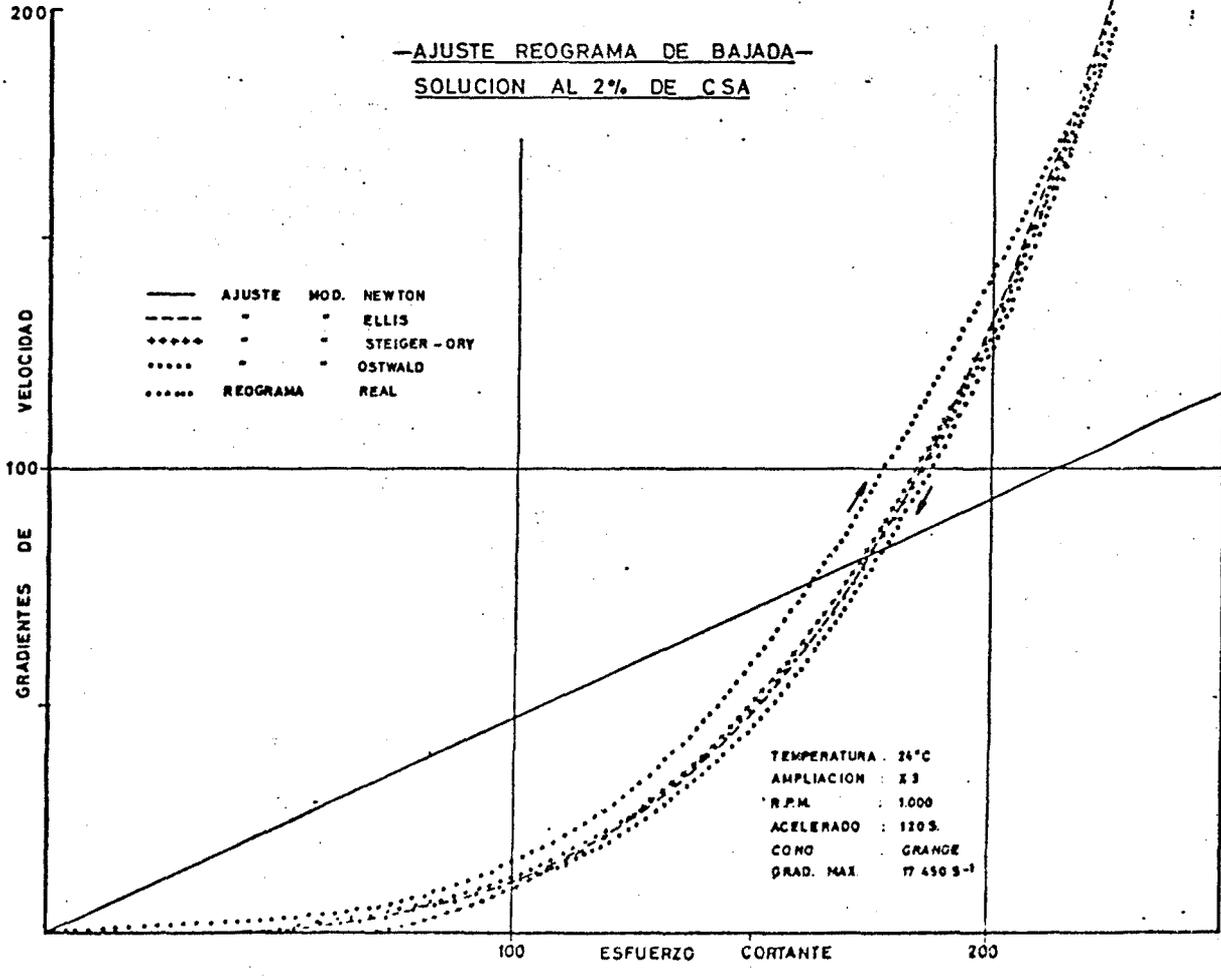
ERRORES CUADRATICOS MEDIOS SOBRE EL REOGRAMA DIRECTO

PRODUCTO MODELO	ACEITE SAE 20 AX 28°C	ACEITE SAE 20 AX 21°C	SOLUCION C.S.A. 2% 24°C Bajada	SOLUCION C.S.A. 2% 24°C Subida	SOLUCION C.M.C. 2% 21°C
NEWTON	1,43751	0,796166	30,8858	30,3161	
OSTWAL	A) - B) 2,17414 C) -	A) - B) 1,3684 C) -	A) 6,80336 B) 1,94056 C) 0,684891	A) - B) 2,72502 C) -	A) - B) 6,0849 C) -
STEIGER-ORY	1,37124	0,791729	2,65342	1,84191	2,27857
ELI IS			0,331627	2,37704	2,7411

A) ordenada experimental mínima admitida para el cálculo 0,1 Número de puntos empleados en
 B) = = = = = 0,5 cada ajuste " "
 C) = = = = = 10 Ordenada máxima 20,0
 C.M.C. Carboximetilcelulosa C.S.A.



Fig



Fig

La ley de OSTWALD presenta así mismo una desviación para altos gradientes de velocidad, efecto que también se observa en las figuras 1.31, 1.32 y 1.33 en que las desviaciones se producen cerca del gradiente máximo alcanzado, de 17.450 s^{-1} , valor elevado y difícil de encontrar en los flujos normales.

Dada la simplicidad de representación (sólo dos parámetros), su fácil manejo, la simplicidad de ajuste (manual, pasando a escalas logarítmicas), la calidad obtenida por la ley de OSTWALD respecto a otros modelos más complejos y su actual difusión en la técnica como modelo más general, centramos nuestro trabajo en ésta.

NOMENCLATURA

Capítulo I y Anejo I.4.

\vec{q}, \vec{q}_m	Velocidad en un punto.
\vec{r}, \vec{dr}, d	Distancia, radio, distancia entre dos - puntos.
\vec{b}	Variación espacial de la velocidad, ten - sor.
$\vec{d}, \vec{\epsilon}$	Tensor velocidad de deformación.
$\vec{\epsilon}$	Tensor deformación.
t, dt	Tiempo.
$\epsilon, \epsilon_t, \epsilon_f, \epsilon_e$	Deformación, total, permanente, elásti - ca.
σ	Esfuerzo normal.
V	Volumen.
T	Temperatura.
E	Módulo de elasticidad.
$\vec{\tau}, \tau_{\mu ij}$	Tensor tensión.
τ_{μ}, τ_{μ}	Presión.
p	Presión.
n	Número de moléculas en la unidad de vo - lumen.
$\overset{3}{R}$	Constante de los gases.
β	Módulo de compresibilidad.
ρ	Densidad.
μ, μ_0, μ_{∞}	Viscosidad, límite gradientes bajos y - elevados, diferencial y aparente.
μ_d, μ_{ap}	

$\tau, \tau_o, \tau_{xy},$ $\tau_{re}, \tau^*, \tau_{max}$	Esfuerzo cortante, límite, según coordenadas, máximo.
K	Coefficiente del modelo de KEPES.
$A_{mn}^{ij}, B_{mn}^{ij}, C_{mn}^{ij}$ $\delta_{ij}, \bar{\delta}$	Coefficientes tensoriales. Delta de KRONECKER.
A, B, C, ... a, b, c, ... A_1, B_1 ... a_1, b_1, \dots etc.	Coefficientes escalares, coefficients - parámetros de los diversos modelos y de las expresiones polinómicas.
I, II, III	Invariantes principales de los tensores.
\bar{t}	Tensor de segundo orden.
λ	Valor propio de la ecuación característica. polinomio.
m, K, Kl	Coefficiente de consistencia (OSTWALD).
n	Indice de comportamiento fluido (OSTWALD).
$D, \frac{du}{dy}, -\frac{de}{dr}$	Gradiente de velocidad, según eje y radio.
u	Componente de la velocidad en la dirección x.
P, M, N	Parámetros de la expresión de la velocidad en función de la temperatura.
$x, y, x_i, y_i, x_o, y_o,$ x_1, y_1, x_n, y_n	Coordenadas cartesianas, generalizadas, en el punto 0, desde 1 a n.
R.P.M.	Revoluciones por minuto.

C_1, C_2	Coefficientes característicos del cono.
Z_1, Z_2	Coefficientes de transformación de los - valores coordenados.
ϵ_y	Error según el eje y.
Y, p_i	Coefficientes de ponderación en el ajus- te experimental.

BIBLIOGRAFIA - CAPITULO I

1. - APUNTES DE MECANICA DE FLUIDOS, E.T.S.I.I.B. -
(agotado).
2. - CURSO DE REOLOGIA (sin editar), E.T.S.I.I.B. -
(autor).
3. - BELLET, "Etude des Ecoulements non-newtoniens".
Seminario de Reología de la E.T.S.I.I.B. (sin edi
tar).
4. - THIRRIOT, "Un point de vue de L'Hydrauliciens sur
la Rheologie et la thermodynamique des liquides
organiques". XII Journées de L'Hydraulique. Pa-
ris 1.972.
5. - ALARCON, "Nociones de Reología". Facultad de Cien
cias. Sección de Física. Madrid.
6. - FERNANDEZ, BERNALTE, NAVARRO, PAZ, "Introducción
a la Mecánica de los Medios Continuos". E.T.S.A.
B., 1.971.
7. - BELLET, "Panorama des milieux continues entre so
lides et liquides", Rhological. Acta 12, 299-310.
1.973.
8. - BELLET, "Relation entre le compartement Rheologi
que pseudoplastiques et echanges thermiques". -
Thèse. Université Paul Sabatier. Toulouse.

9. - VISCO-NEWS Nº 7, Contraes S.A. (Publicación no pe
riódica)
10. - LA VISCOSITE, Contraes S.A. (Publicación no perió
dica.
11. - FITO. "La tecnología de los fluidos no newtonia-
nos dentro de la ingeniería de los alimentos!"
I coloquio sobre problemática industrial e inves-
tigadora en el campo de la reología. Barcelona.
12. - CLOTET. "Comportamiento no newtoniano de ciertos
cultivos líquidos de microorganismos".
I coloquio sobre problemática industrial e inves-
tigadora en el campo de la reología. Barcelona.
13. - LA TREMPE Nº 53 (Publicación no periódica).
14. - FREDRICKSON. "Principles and Applications of -
Rheology". Prentice Hall, 1.964.
15. - GONTIER. "Mecanique des milieux deformables".
DUNOD, 1.969.
16. - VAN WACER "Viscosity and Flow Meosument". Inter
sciencie.
17. - PATTON. "Point Flow and Pigment Dispersion". In-
tersciencie.
18. - SHERMANN, "Industrial Rheology". Academic Press.

19. - SCOTT BLAIR. "Elementary Rheology". Academic Press.
20. - SHERMAN. "Emulsion Sciencia". Academic Press.
21. - WILKINSON. "Non-Newtonian Fluids". Reogram Press.
22. - EIRICH, "Rheology", tomos I,II,III,IV. Academic Press.
23. - Seminario de fluidos orgánicos macromoleculares. (Sin editar).
24. - PASCUAL. "Curso de Reología", I.Q.S. (sin editar).
25. - ROCHAS, "Ecoulement de fluides non newtoniens". Laboratoire d'Infiltration.
26. - Journal de Mecanique, Vol 8 nº 2. Juin 1.969.
27. - Colloque "Calcul numerique, calcul phisique". Paris 19 mars 1.960. Ministaire de L'Aire. N.T.,99.

C A P I T U L O I I

TECNICAS DE CARACTERIZACION DE LOS FLUIDOS NO-NEUTO-
NIANOS.

INSTRUMENTACION

Para el hombre una existencia sin examen es algo que
no vale la pena vivirse (Apología, 38 a).

C A P I T U L O I I

TECNICAS DE CARACTERIZACION DE LOS FLUIDOS NO-NEWTONIA- NOS SEUDOPLASTICOS. INSTRUMENTACION.

2.1. - INTRODUCCION

En las actividades industriales, diseño, control de calidad de materias, control de fabricación, - aplicación de productos, almacenamiento, etc., en los que interviene un fluido, es de gran interés la especificación de esta sustancia.

Las diferencias entre los estados físicos de la materia suelen expresarse por la dureza, la elasticidad y la viscosidad. Las especificaciones pretenden definir el fluido de una forma más completa, utilizando conceptos como el punto de gota, el punto de fusión y de solidificación, tiempo de vida en estado líquido y otros, nociones en general ampliamente utilizadas desde antiguo, con definiciones en muchos casos imprecisas y algo desconexionadas, cuantitativamente, del comportamiento hidrodinámico del fluido.

Para el estudio del derrame de un fluido newtoniano se exige la caracterización de éste a través del conocimiento del reograma, que representa la manifestación de la relación entre esfuerzos cortantes y gradientes de velocidades resultado del movimiento del fluid

do a través de una geometría dada. Este reograma es función de otras variables, como tiempo, temperatura y concentración, y debe evidenciar el límite de fluencia, la tixotropía y el comportamiento elástico, de existir éstos.

El interés de conocer el reograma o la propiedad reológica se extiende además, a las relaciones que existen entre éste y las características organolépticas o factores de calidad, a la comprobación del método de fabricación y, en general, a todas las operaciones unitarias de circulación, transferencia de masa y de calor.

Algunos ejemplos de estas últimas aplicaciones son : las características organolépticas de las mermeladas, tales como su fácil esparcimiento o destrucción tixotrópica, la falta de goteo o existencia de un límite de fluidez, que según el método de fabricación, sea por batido o en caliente, dan comportamientos reológicos diferentes. El límite de fluencia, el carácter pseudoplástico y la tixotropía a elevados, medios o bajos gradientes de velocidad de las lacas y pinturas determinan diferentes comportamientos al escurrimiento, goteo, extensibilidad y aplicabilidad a pistola y a mano y, análogamente, se establecen correlaciones de este tipo para las grasas, ceras, escorias, tintas, vidrios, concentrados alimenticios, etc. Las aplicaciones se encuentran en todos los campos de la industria, alcanzando a la Biología : movilidad de la sangre y otros líquidos orgánicos que para distintas enfermedades (leucemias, anemias, infecciones, etc.) varían con la cantidad y forma de los glóbulos y demás microorganismos, así como con las proteínas presentes.

La existencia de gradientes de velocidad y de esfuerzos cortantes en todo proceso donde intervenga un fluido en movimiento, y con ella los fenómenos de transporte, plantea la necesidad de conocer cuantitativamente el carácter reológico del fluido y las ecuaciones aplicables al proceso.

La búsqueda de calidad, la racionalización, el desarrollo de los métodos de estudio, la comprensión de los fenómenos físicos y de los procesos industriales, vienen ligados a la mejora del método y de la instrumentación para obtener medidas que respondan a las necesidades actuales.

Las condiciones de medida vienen dadas por los gradientes de velocidad y esfuerzos cortantes impuestos en la práctica. Estos nos condicionan al instrumento a emplear, que tendrá un campo de gradientes de velocidades y esfuerzos cortantes limitado. Es decir, la elección del aparato es función de la viscosidad aparente y es ésta la medida que, de una manera cuantificable o arbitraria, busca la viscosimetría clásica. Si el dispositivo de medida utiliza la densidad, se obtiene la noción de viscosidad cinemática. De este mismo concepto viene la necesidad de un cuidadoso termostatao y de un reducido desarrollo de calor en el aparato y muestra fluida.

La medida obtenida puede ser arbitraria o fundamental y, según esto, BREADLY y PATTON clasifican los reoviscosímetros en :

- a) - fundamentales : capilares, cilindros concéntricos, caída de bola, banda, cono-plato.
- b) - arbitrarios : burbuja, disco, orificios, copa, - paletas.

En los primeros, el comportamiento del fluido en movimiento o reograma puede representarse por un modelo matemático, en que intervienen los parámetros (físicos) en número que es función de la complejidad del problema, del grado de precisión deseado y del campo de validez. WELTMAN da una clasificación análoga.

El diseño de los aparatos está condicionado por la localización espacial de la medida, es decir, se pueden clasificar según se pretenda una medida in-situ o sobre muestra. La medida in-situ emplea una caracterización o control en la que se pueden utilizar singularidades existentes en la instalación o pequeños instrumentos auxiliares. Entre las singulares se encuentran las normalizadas, como venturis, diafragmas y tuberías. Entre las no normalizadas se encuentran los codos, divergentes, - convergentes, etc. y otras especiales como los anemómetros, ultrasonidos, caudalímetros electromagnéticos y medios fotográficos, pudiendo estar instaladas en serie o en derivación (by-pass). Los instrumentos auxiliares más extendidos son las copas de derrame y los tubos de burbuja.

La medida sobre muestra es la más precisa, - precediendo a la explotación de la medida in-situ. Sobre la muestra se obtiene el reograma que, salvo efectos de tipo temporal y elástico y en el caso más frecuente de -

derrame con simetría plana o de revolución, simplifica - el número de doce magnitudes variables a dos, reduciéndose de :

$$\bar{\varphi} = f(\bar{\dot{\epsilon}}) \quad \text{a} \quad \varphi = f(\dot{\epsilon}) = f\left(\frac{du}{dy}\right)$$

ya comentada en el capítulo anterior.

La caracterización de los aparatos de medida instalados in-situ se realiza a partir del reograma obtenido sobre la muestra del fluido y, según la finalidad de la medida, interesa trabajar sobre representaciones de la forma :

$$\varphi = f\left(\frac{du}{dy}\right) \quad \text{ó} \quad \frac{du}{dy} = g(\varphi)$$

respectivamente para el cálculo de esfuerzos cortantes y de gradientes de velocidad.

La realización de la medida, según el instrumento empleado, lleva a la obtención del reograma de forma directa, con la aplicación de alguna expresión, o a la indirecta, resultado de una correlación entre parámetros y fenómenos físicos. En este caso, será preciso presuponer un cierto modelo matemático del comportamiento, siendo éste innecesario para la obtención directa.

En el caso que nos ocupa, fluido pseudoplástico, la representación puede linealizarse, para cierto campo de gradientes de velocidad, o extrapolarse a formas asintóticas, quedando el problema muy simplificado y la ley de OSTWALD reducida a un modelo de BIRCHAM o de NEWTON (fig. 2.1.)

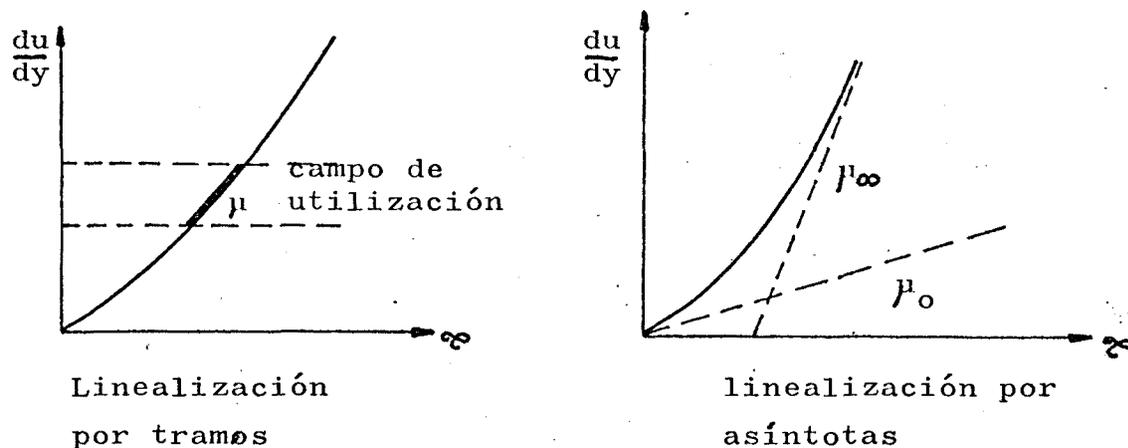


Figura 2.1.

En este capítulo se presentan una serie de instrumentos de medida sobre muestra, fundamentales en toda caracterización reológica, sin que se excluya la aplicación de alguno de ellos in-situ. De este primer estudio se obtiene el campo de aplicación y características de los reoviscosímetros, de los cuales se selecciona el cono-plato FERRANTI empleado en este estudio.

2.2. - VISCOSIMETROS CAPILARES

2.2.1. - INTRODUCCION

Los sumerios, 3.000 a J.C. utilizaron el derrame laminar en el interior de un capilar como control de caudal y reloj de agua. Basado en el mismo principio, se utiliza 1.540 años a.J.C., aunque hasta 1.839 d. J.C. no aparece como instrumento de medida basado en los tra-

bajos de HAGEN-POISEUILLE sobre el movimiento de la sangre, fluido no-newtoniano, en los capilares. La ecuación denominada de POISEUILLE, fue determinada por WIEDERMAN y HAGENBAGH partiendo de la de NEWTON. El capilar es el único viscosímetro empleado hasta 1.890, cuando COUETTE desarrolla el de cilindros coaxiales.

Su aplicación en Reología está muy difundida, siendo el principio de su funcionamiento la medida de la pérdida de carga producida por la circulación de cierto caudal en el interior de un tubo de sección circular de relación longitud/diámetro grande. Fundamentalmente consta de un recipiente para contener el fluido, de un tubo y de un control y medida de presiones, caudales y temperaturas.

La fuerza motriz empleada puede ser la hidroestática, para bajas viscosidades y fluidos newtonianos. La utilización de una presión exterior aumenta el campo de aplicación para altas viscosidades y para fluidos no-newtonianos. Esta presión exterior puede imponerse por un peso muerto, una acción neumática o mecánica, denominándose entonces capilares a extrusión, plastómetros, reómetros o consistómetros.

2.2.2. - DERRAME CAPILAR

El flujo interno de un fluido en un tubo capilar se plantea partiendo de la ecuación de NAVIER-STO-

KES y según las hipótesis de que :

- El derrame es permanente, bidimensional, isotérmico y laminar.
- La velocidad axial es función de la distancia al eje.
- No hay deslizamiento fluido-sólido.
- El capilar es infinito.
- El fluido es viscoso e incompresible.
- El derrame no está sometido a fuerzas externas (es gravitatorio horizontal).

Bajo estas hipótesis, el equilibrio de fuerzas sobre un cilindro en el interior del fluido en movimiento da (fig. 2.2.)

$$\varphi = \frac{\Delta p \cdot r}{2 \cdot L}$$

con un caudal circulante :

$$Q = \int_0^R 2 \pi \cdot r \cdot v(r) \, dr$$

y una función reológica $-\frac{du}{dr} = f(\varphi)$

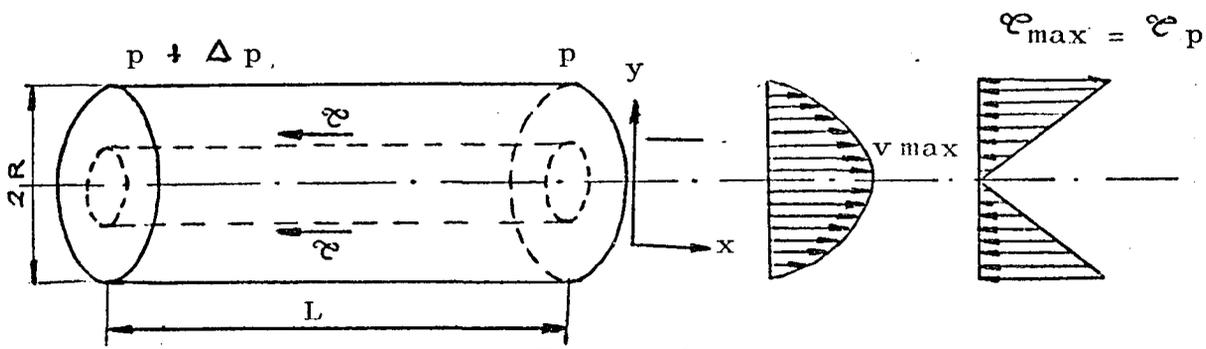


Figura 2.2..

de lo que se deduce la ecuación de HAGEN-POISEUILLE -
(BUCKINGHAM-REINER-RABINOWITSCH-MOONEY)

$$\frac{4 Q}{\pi R^3} = \frac{4}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} f(\tau) \tau^2 d\tau = D(\tau_p)$$

2.2.3. - ERRORES POR INCUMPLIMIENTO DE LAS HIPOTESIS

El capilar está sometido a una serie de condicionamientos geométricos y físicos debidos a la tecnología, así como el incumplimiento de ciertas hipótesis de las enunciadas y a los errores típicos de toda medida.

El derrame laminar puede dejar de serlo, pasando a transitorio y turbulento. El número de REYNOLDS, generalizado a todos los fluidos, permite definir el tipo de derrame, no siendo aconsejable superar el valor de mil. RYAN y JOHNSON dan criterios de estabilidad local - más precisos, laboriosos, poco generalizados y difíciles de aplicar, por basarse en el perfil de velocidades, a priori desconocido en este tipo de viscosímetro.

En los fluidos que no mojan el sólido, cuando se forma una capa molecular de otro medio (aire o vapor), en los casos de orientación molecular en los sistemas monofásicos o disgregación de partículas en los bifásicos, cuando se produce adherencia o absorción, la velocidad en la pared puede no ser nula debido a un fenómeno de "lubricación", que también es función de la rugosidad del tubo. Entonces, en la pared el comportamiento suele ser newtoniano en un espesor "e", produciéndose a esta distancia de aquella una velocidad de deslizamiento que se manifiesta en un incremento de caudal. En la ecuación de RABINOWTSCH se introduce un término correctivo, resultado del estudio por partes del derrame.

El capilar, no siendo infinito y estando limitado por una entrada y salida, introduce una pérdida de carga en estas singularidades; un fenómeno de longitud de entrada y una pérdida de energía cinética en la salida, que puede ser considerable (HAGENBACH, BELL, CANNON). El planteo de estas energías perdidas es sencillo, aunque su cálculo, molesto. Normalmente, las pérdidas de carga en la entrada y en la salida se expresan en tubería equivalente (COUETTE), y en forma análoga, las otras. Para grandes longitudes, pueden despreciarse y se eliminan trabajando con una longitud diferencial de capilares de igual diámetro y diferentes longitudes (fig. 2.3.).

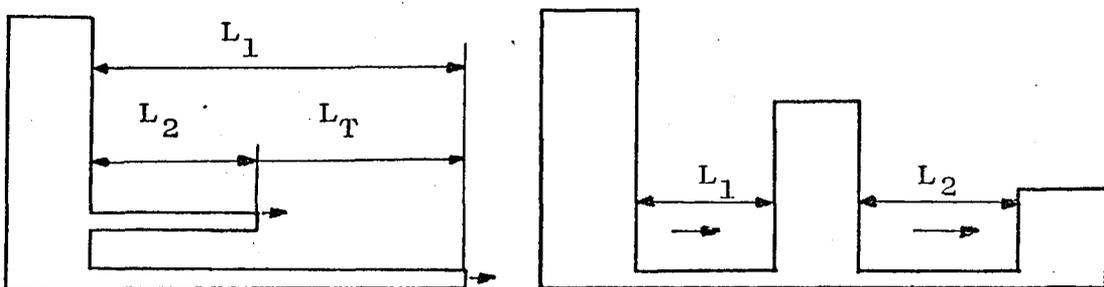


Figura 2.3.

La compresibilidad del fluido y su viscoelasticidad introducen energías de deformación normalmente - despreciables (PHILIPPOFF, GASKIN).

El frotamiento del fluido produce una energía calorífica que para ser evacuada precisa de un gradiente de temperaturas radial y longitudinal, lo que imposibilita la condición isotérmica. Para gradientes de velocidades bajos, el calor que se genera no es elevado, pudiéndose suponer que a cierta distancia de la entrada la temperatura se estabiliza. (Longitud utilizable).

Otro fenómeno térmico de interés es la variación del diámetro del capilar al trabajar a temperaturas distintas de la de calibrado. En la expresión desarrollada de RABINOWITSCH, el diámetro interviene elevado a la quinta potencia, lo que causa, su incidencia en la expresión y el interés en cuantificarlo de forma precisa.

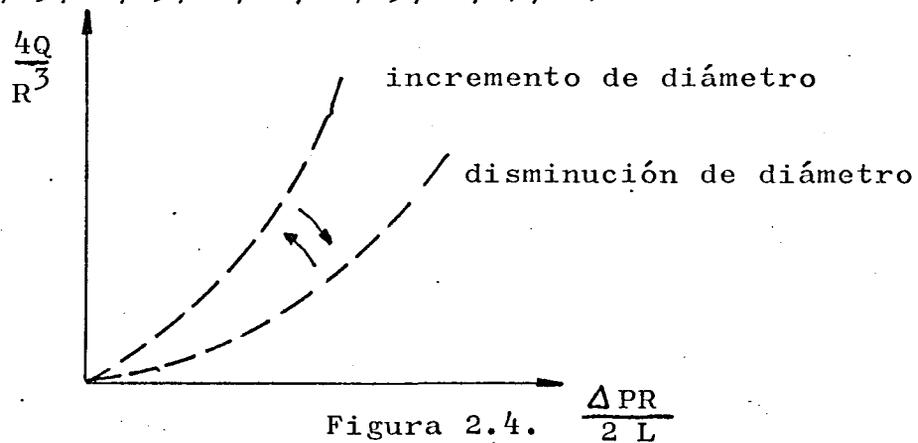
La tensión superficial, en la superficie libre del fluido, da fuerzas del orden de magnitud de las ocasionadas por las presiones motrices bajas. La corrección no es cómoda por ser diferente de un fluido a otro (por lo tanto distintas a la de calibrado). La pequeña modificación de presión motriz que estas fuerzas ocasionan puede ser despreciada para presiones elevadas.

Cuando la fuerza motriz adicional se introduce por métodos mecánicos (pistón), se ha de descontar la fricción émbolo-cilindro del incremento de presión total.

El envejecimiento o degradación temporal del fluido puede modificar las características de éste durante el ensayo. La representación gráfica de :

$$\frac{4Q}{\pi R^2} = f \left(\frac{\Delta P \cdot R}{2 \cdot L} \right)$$

independiente del diámetro del capilar, nos evidencia la existencia de tixotropía o reopexia (fig. 2.4.) (1,2,3,4, 7,9,12,13,14,15,18,20,24,25,26,27,48).



2.3. - REOVISCOSIMETROS ROTACIONALES

2.3.1. - INTRODUCCION

El principio de funcionamiento de los reoviscosímetros rotacionales es el giro relativo entre dos sólidos, cizallando el fluido existente entre ambos. El conocimiento de las características geométricas del apar-

to, el control de la velocidad de giro y del momento - opuesto a éste y de la temperatura permiten inferir el - carácter reológico del fluido.

En este grupo se encuentran la mayoría de los viscosímetros del mercado, dadas sus posibilidades de am plios campos de gradientes de velocidades y cortaduras, diferenciándose según la forma geométrica de los elementos móvil y fijo, entre los que se crea la rotación relativa. Así encontramos :

- a) - dos cilindros coaxiales.
- b) - único cilindro en medio infinito.
- c) - cono y plato.
- d) - cono y cono.
- e) - plato y plato.
- f) - cono-cilindro y cilindro exterior.
- g) - único disco en medio infinito.
- h) - esferas concéntricas.

y otros, combinación de las formas fundamentales a,b,c y h.

Las medidas a realizar, según los casos, son :

- 1) - del par opuesto al movimiento a velocidad constante del cilindro interior.
- 2) - de la velocidad del cilindro interior que gira a - par constante (SEAKE, STORNER).
- 3) - del par opuesto al giro a velocidad controlada, cons tante o variable, del elemento interior (FERRANTI, ROTOVISKO, RHEOMAT, ROBERT- WEISSEMBERG, BROOKFIELD).

Las hipótesis empleadas en los reoviscosímetros rotacionales para el estudio hidrodinámico del fluido son :

- el derrame es permanente, bidimensional, laminar e isotérmico.
- el derrame no está sometido a fuerzas externas (gravitatorio horizontal), ni a fuerzas centrífugas ni de inercia.
- el flujo es paralelo a las paredes sólidas, sin efectos de borde o finales (elementos infinitos) y sin deslizamiento sólido-fluido.
- el fluido es incompresible y viscoso puro.

análogas a las de los reoviscosímetros capilares.

2.3.2. - DE CILINDROS COAXIALES

El gradiente de velocidades y las fuerzas de cizalladura, así como sus distribuciones, son funciones del carácter reológico, de la posición en el seno del fluido y de la hidrodinámica (geometría). En el entrehierro de los cilindros coaxiales, la distribución de velocidades es función del carácter reológico (fig. 2.5) - (siembra de confetis, emisión de burbujas).

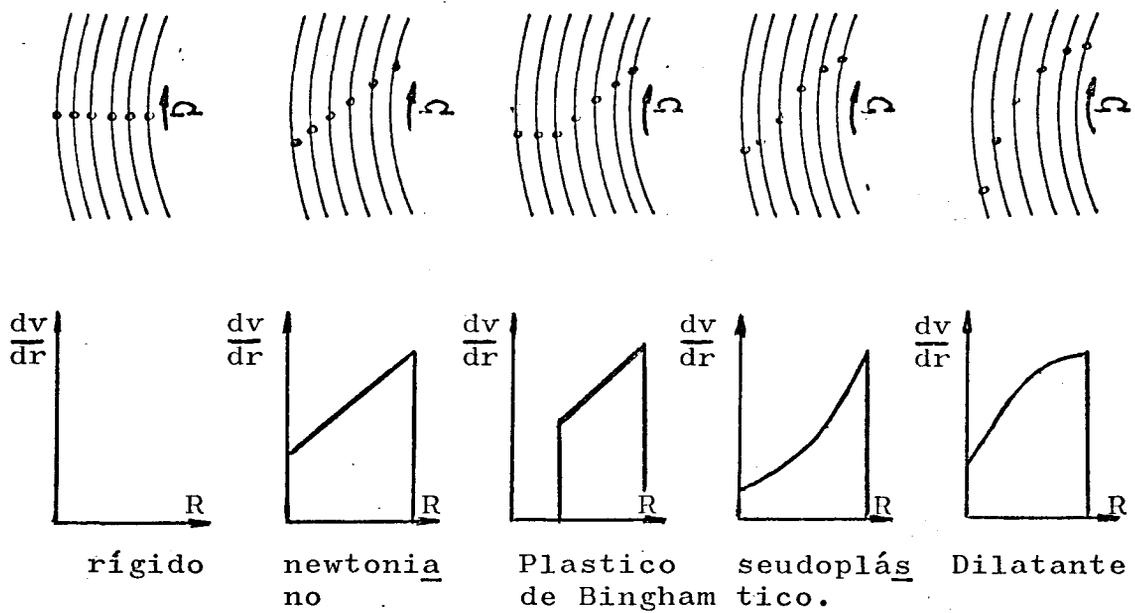


Figura 2.5.

Es más frecuente la medida del par opuesto - por el fluido al movimiento a velocidad constante. (Fig. 2.6.). La ecuación del equilibrio en las paredes es :

$$M = \tau_e \cdot 2\pi \cdot R_e^2 \cdot h = \tau_i \cdot 2\pi \cdot R_i^2 \cdot h$$

La relación $\frac{R_i^2}{R_e^2} = \frac{\tau_e}{\tau_i} = \epsilon$ caracteriza al aparato.

En el caso de cilindro interior en movimiento con velocidad angular Ω , y exterior quieto :

$$\Omega = \frac{1}{2} \int_{\tau_i}^{\tau_e} f(\tau) \frac{d\tau}{\tau}$$

Si el cilindro interior es único (cilindro en medio infinito), τ_e será nula; diferenciando esta última expresión respecto de τ_i se obtiene :

$$f(\tau_i) = -2 \frac{d\Omega}{d \ln \tau}$$

La función reológica es la pendiente del gráfico de velocidades de giro respecto al $\ln \tau_i$, siempre - que no haya un esfuerzo cortante inicial.

Es frecuente disponer de varios cilindros para un solo aparato, es decir, poder utilizar diversas relaciones :

$$\varepsilon_i^2 = \frac{R_e^2}{R_i^2}$$

si se intercambia el cilindro interior. Para este caso - (cilindro interior intercambiable, τ_e constante), se diferencia la expresión general obtenida respecto ε y se obtiene :

$$\left(\frac{\partial \Omega}{\partial \varepsilon} \right)_{\tau_e} = \text{cte.} = - \frac{f(\varepsilon^2 \tau_e)}{\varepsilon} = \frac{-f(\tau_i)}{\varepsilon}$$

La pendiente de la curva de velocidades de giro respecto al valor característico determina el reograma $f(\tau_i)$. - Con sólo dos cilindros intercambiables se comete un error de truncamiento en la serie obtenida como reograma, función del valor ε_m , medio de los empleados.

Es frecuente emplear la aproximación :

$$f(\tau_i) = \Omega \frac{R_e}{\Delta R}$$

para entrehierros reducidos, siendo prácticamente exacta si $\varepsilon < 1\%$; no puede entonces, emplearse este aparato para la caracterización de suspensiones.

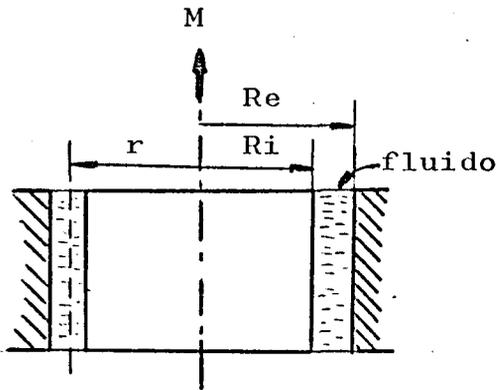


Figura 2.6.

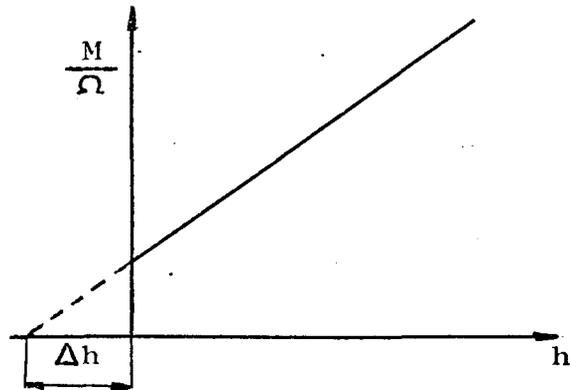


Figura 2.6. bis.

2.3.3. - ERRORES POR INCUMPLIMIENTO DE LAS HIPOTESIS

Al igual que en los reoviscosímetros capilares, en los de cilindros coaxiales se presenta la posibilidad de régimen turbulento a partir del valor crítico - del número de REYNOLDS, que según COUETTE se expresa para el cilindro interior :

$$NR_e = \Omega \frac{R_i (R_e - R_i) \rho}{\mu}$$

siendo su valor crítico $NR_{e_{cr}} = 41,3 \sqrt{\frac{R_e}{R_e - R_i}}$

que puede alcanzar, según TAYLOR, el valor de 12.500 en régimen laminar.

Este valor del número de REYNOLDS crítico limita la velocidad de giro del cilindro interior a :

$$\Omega = \sqrt{\frac{\pi^4 \mu^2 (R_i - R_e)}{2 \rho^2 (R_i - R_e)^3 R_e^2 \cdot C}}$$

C coeficiente función del radio interno y externo.

El deslizamiento del fluido en la pared de los cilindros se trata de manera análoga a la expuesta en los reoviscosímetros capilares.

El incumplimiento de la hipótesis de cilindros de altura infinita está siempre presente a pesar de los diseños ingeniosos para eliminar los efectos de fondo, discontinuidades en los bordes y en la parte superior emergente y alteración de la distribución de velocidades.

El fondo del cilindro produce el mismo efecto que una altura adicional Δh , no real del cilindro. (Fig. 2.6.).

Los ensayos a alturas diferentes y su posterior representación permiten determinar el h a introducir en la ecuación de MARGULES :

$$M = \frac{4 \pi (h + \Delta h) \mu \Omega}{\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2}}$$

En el entrehierro de los cilindros coaxiales se diferencian tres zonas de flujo, representadas en la figura 2.7. OKA y SATO, partiendo de las ecuaciones de -

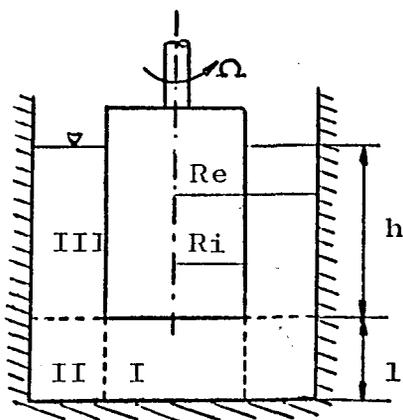


Figura 2.7.

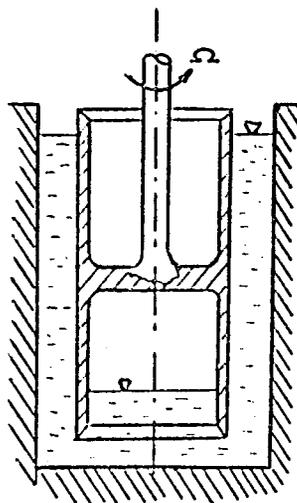


Figura 2.8.

NAVIER-STOKES, han encontrado la solución para un fluido de NEWTON, que es una expresión compleja de funciones de BESSEL. LINDSLEY y FISCHER anotan que este fenómeno no es digno de consideración cuando la altura del cilindro es igual o mayor que el radio y si el huelgo entre cilindros es pequeño. El diseño de la fig. 2.8. reduce este fenómeno.

Un error característico y frecuente en estos reoviscosímetros es la excentricidad de los dos cilindros. En estas condiciones, el flujo no es simétrico ni bidimensional. El momento medido es una función de la excentricidad relativa de los cilindros, p.e. INGLIS y COUETTE dan :

$$M = \frac{2 \eta \mu v (R_i + \Delta R)^2}{\Delta R} \left[1 - \frac{\Delta R}{2R_i} - c^2 + \frac{9 \Delta R c^2}{4R_i} + \dots \right]$$

$$\Delta R = R_i - R_e$$

$$c = \frac{\text{distancia interejes}}{d}$$

Los fenómenos de tipo térmico también son frecuentes. El cizallamiento del fluido produce calor en el interior de éste, tanto más cuanto más elevada es la velocidad de cizalladura. En la evacuación de este calor interviene la conductividad del fluido y de las paredes, que han de estar bien termostatadas. Es de desear un gradiente térmico total reducido. Para una "viscosidad" dada, el salto térmico crece con el cuadrado del huelgo y con el cuadrado del gradiente de velocidades.

WELTMAN y KUHNS han realizado un trabajo completo sobre la distribución de temperaturas en el huelgo.

Una mala evacuación de calor da un calentamiento progresivo del fluido, que presenta entonces un comportamiento análogo a la tixotropía (1,2,4,5,8,12,13,14,15,33,39,43,51,56).

2.3.4. - DE CONO-PLATO

Las hipótesis para el estudio de este reoviscosímetro son análogas a las enunciadas para los de cilindros coaxiales.

Dada su geometría (fig. 2.9) y para ángulos ψ pequeños, se plantea en coordenadas cilíndricas el valor del esfuerzo cortante :

$$\tau_{\theta \phi} = \mu \operatorname{sen} \theta \frac{d\omega}{d\theta}$$

que ocasiona un momento elemental. Este, integrado en la superficie del disco da :

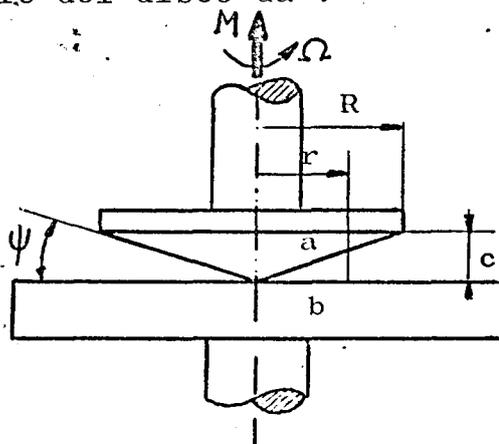


Figura 2.9.

$$M = \frac{2 \pi r^3}{3} \mu \Omega \left[\int_{\pi/2}^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sin^3 \theta} \right]^{-1} =$$

$$= \frac{4 \pi r^3}{3} \mu \Omega \left[\frac{\sin \psi}{\cos^2 \psi} - \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2} \right) \right]^{-1}$$

y con ψ pequeño se cumple :

$$M = \frac{2 \pi r^3}{3 \psi} \Omega \mu ; \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{r}{c} ;$$

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\Omega r}{c} = \frac{\Omega}{\psi} \text{ s}^{-1} ; \quad \mathcal{Z} = \frac{3M}{2 \pi R^3}$$

$$\mu = \frac{3 M / 2 \pi R^3}{\Omega / \psi}$$

El valor de ψ se sitúa entre 0,3 y 0,4 grados.

Este planteamiento para fluidos newtonianos, dadas las condiciones uniformes de cortadura y la constancia del gradiente de velocidades para esta geometría, es válido para cualquier tipo de fluido puramente viscoso.

2.3.5. - ERRORES POR INCUMPLIMIENTO DE LAS HIPOTESIS

El número de REYNOLDS :

$$N R_e = \frac{\Omega \cdot R \cdot c_{r=R}}{\mu}$$

da el límite del régimen laminar. La turbulencia difícilmente se presenta, pues el ángulo ψ es pequeño y las viscosidades moderadamente elevadas, por lo que las velocidades pueden ser considerables dentro del régimen laminar. (Para $R = 3,5$ cm., $\psi = 0,3$ grados y 1.000 r.p.m., siendo el fluido agua, no se alcanza el valor crítico en el reo viscosímetro FERRANTI).

La geometría del cono-plato puede introducir los errores siguientes :

- Desplazamiento de los ejes. Se elimina haciendo mayor el plato para que, de hecho, no exista tal desplazamiento.
- Inclinación del cono respecto al plato. Produce asimetría en el flujo. Si la inclinación es θ :

$$M = \frac{2 \pi \mu \Omega R^3}{3 \psi} \left[1 - \left(\frac{\theta}{\psi} \right)^2 \right]$$

y para θ menor igual que ψ :

$$M = \frac{2 \pi \mu R^3}{3 \psi} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\theta}{\psi} \right)^2 \right]$$

su incidencia es pequeña. Así, para θ igual a 0,7, da un error del 0,1 %. La robustez de estos aparatos hace que se encuentre por debajo de estos valores.

- Vértice del cono separado una distancia h del plato. - La corrección a introducir es :

$$M = \frac{2 \pi \mu \Omega R^3}{3 \psi} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{d}{R\psi} + 3 \left(\frac{d}{R\psi} \right)^3 + 5 \left(\frac{d}{R\psi} \right)^5 \ln \frac{d/R\psi}{1 + d/R\psi} \right]$$

(Para $d = 0,000254$ cm ; $R = 3,5$ cm ; $\psi = 0,3$ grados, -
1.000 r.p.m. y fluido agua, el error del momento es -
del 1,5 %). Interesa que el aparato disponga de un pre
ciso control de esta distancia.

El calor generado por la cizalladura por uni
dad de volumen es :

$$\text{calor generado } E = \tau \cdot D = \frac{3M \Omega}{2 \pi R^3 \psi}$$

$$\text{volumen } Vol = \int_0^R 2 \pi r^2 dr \psi = \frac{2}{3} R^3 \psi$$

$$\text{calor por unidad de volumen } H = \frac{E}{Vol} = M \cdot \Omega$$

que, suponiendo que se disipe por igual entre cono y pla
to en un elemento anular definido por r y dr , se produ-
ce un incremento de temperatura :

$$\Delta T = \frac{r \psi H}{k} \left(\frac{x t}{\pi} \right)^{1/2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los valores de ψ pequeños favorecen el esca
pe de calor generado, dando pequeños incrementos de tem-
peratura. (Para un aceite de silicona, 9,1 p., gradiente
de velocidades de 9.350 s^{-1} ; $\psi = 0,3$ grados, $R = 3,5$ -
cm., se genera 8,2 cal/cm³/s y, en tres minutos de en-
sayo, se obtiene un incremento de temperatura de 1,2 $^{\circ}\text{C}$
a un radio de 1,6 cm, lo que da un error sobre el momen-
to del orden del 2%).

El posible centrifugado del fluido, para al-
tas velocidades de giro, no ocurre, pues la capilaridad
de una fuerza centrípeta mayor. Si el fluido presenta ca

rácter viscoelástico, el efecto WEISSEMBERG tiende, también, a extrangularlo hacia el centro (1,2,4,5,6,8,9,10, 12,13,14,15,19,20,21,22,22 bis, 40,43,48,51).

2.4. - OTROS VISCOSIMETROS Y REOVISCOSIMETROS

Diversos tipos de reoviscosímetros se han desarrollado, dando origen a equipos más o menos complejos para diferentes aplicaciones. En esta presentación sólo interesan aquellos que producen el flujo del fluido con unas condiciones de contorno tales que su estudio sea - abordable matemáticamente. Es frecuente que estos aparatos sean, en cierto modo, modelos del proceso que se controla.

2.4.1. - DE PLACAS DESLIZANTES

Bajo este nombre se pueden agrupar los de banda y placas deslizantes.

Es viscosímetro de banda hace deslizar a ésta, teóricamente infinita, por el interior de una rendija formada por dos caras planas paralelas.

Ha sido desarrollado por WACHHOLTZ, ASBECK, HULL, ZETTLEMOYER y COZZENS y comercializado por el N.P. I.R.I. (National Printing Ink Research Institute). Se aplica a fluidos puramente viscosos independientes del tiempo.

El de placas deslizantes consta de dos paralelas separadas por una pequeña distancia (experiencia de NEWTON). Ha sido desarrollado por la ShellDevelopment Company.

2.4.2. - DE FLUJO RADIAL

Consta de dos discos que se aproximan y desplazan radialmente al fluido situado entre ellos. Ha sido estudiado por DIENES Y KLEMM para los fluidos no-newtonianos.

2.4.3. - DE FLUJO AXIAL NO CAPILAR O FLUJO MIXTO

El flujo axial del fluido se logra por la acción de un elemento que lo desplaza. La disposición de este elemento puede ser de cilindros coaxiales con desplazamiento axial (SEGEL Y POCHEITINO), de cilindro que

penetra en la masa del fluido (SMITH y BICKERMANN), de disco (con o sin orificios) que penetra en la masa del fluido (GARDNER), de caída de esfera (STOKES, OSEN, GOLSTEN, ZAHM, LADENBURG, FAXEN, BACON, LEE, LAMB, HOPPER, GRANT, ALTRICHTER, MANDE, FRANCIS, FULMER, WILLIAMS, HOEPPLER, HUBBERD, BRAWN, ACOTT-BLAIR, OESTHEIZEN y MORGAN) y de burbuja.

Si la acción del elemento móvil se logra con una fuerza exterior no gravitatoria, se denomina a estos reoviscosímetro penetrómetros.

De entre todos, hay que resaltar el de caída de bola que, aunque sólo se aplique a fluidos newtonianos, está ampliamente estudiado, es de gran precisión y de fácil manejo.

2.4.4. - ROTACIONALES

El giro de un elemento en el seno del fluido es el principio de funcionamiento de los de este tipo.

De los elementos móviles posibles hay que destacar la geometría esférica (KEPES, WALTERS, YAMAMOTO), formado por dos semiesferas concéntricas que permiten diversidad de movimientos de cortadura entre ellas. Se aplica en viscoelasticidad. Ofrece un amplio campo de medidas de las fuerzas en diversas direcciones gracias al soporte giratorio que sujeta una semiesfera y que traba-

ja como balanza. Entre las fuerzas se puede determinar - la resultante de los esfuerzos normales de tipo elástico (1,2,3,4,5,6,7,8,10,11,12,13,14,15,21,22,22 bis,34,37,40,46,47).

2.5. - RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS DE ALGUNOS VISCOSI METROS Y REOMETROS COMERCIALES

2.5.1. - INTRODUCCION

En el apartado 2.1. de este capítulo se han presentado las características generales que interesa conocer en un instrumento de medida viscosimétrica para su posterior empleo en problemas de caracterización de fluidos.

En los apartados 2.2, 2.3 y 2.4. se han expuesto los principios básicos de funcionamiento de varios reoviscosímetros y se han estudiado las formas generales de las ecuaciones que rigen el flujo del fluido en diversos aparatos.

El hecho de que nos centremos en el estudio hidrodinámico de los fluidos hace que muchos viscosímetros y reoviscosímetros (ultrasonidos por ejemplo) no se presenten en este resumen, así como los viscosímetros de uso común, derrame por orificios, que no permiten un es-

tudio hidrodinámico, y las singularidades y otros elementos utilizados en reoviscosimetría, ya que en estos últimos el estudio es prácticamente inabordable de forma directa y debe hacerse a través de una contrastación con el instrumental descrito en este capítulo y que trabaja sobre muestra, de los cuales se conocen las ecuaciones que permiten determinar el reograma, es decir la caracterización completa del fluido.

Los siguientes cuadros están extractados de la información de los catálogos remitidos por los fabricantes. En ellos se pretende dar la información sobre los diversos instrumentos que, siendo los más sucinta posible, al mismo tiempo proporciona las características fundamentales de cada aparato.

Se incluyen también resúmenes que dan el campo de aplicación de cada reoviscosímetro, según diversos criterios : viscosidades aparentes, gradientes de velocidad, formulación, etc.

2.5.2. - VISCOSIMETROS DE FLUJO AXIAL

Incluimos dentro de este grupo los viscosímetros capilares gravitatorios, de extrusión y de orificio.

Como características fundamentales se señala la norma que siguen (sólo se hará referencia en este capítulo a normas ASTM por ser las más completas), el cam

po de viscosidades cinemáticas cubierto por cada modelo, sus dimensiones principales de diámetro y longitud en milímetros, la capacidad volumétrica del bulbo o tamaño mínimo de muestra necesario, posibilidad de obtener el aparato calibrado (este criterio de calibrado sólo es aplicable a fluidos newtonianos en régimen de funcionamiento hidrostático), campo industrial de aplicación y otras características tales como tiempo mínimo de flujo en cada medida, tipos de aparatos dentro de la denominación de cada modelo, aplicación a líquidos opacos o transparentes, unidades en que se obtiene la medida normalmente y accesorios, como termostatao, control de tiempo y de volumen, lavado automático, dosificación automática, presión regulable, etc. En las tablas II.1 y II.2 se resumen estas características.

2.5.3. - ROTACIONALES

En el grupo de estos viscosímetros tenemos - todos aquellos que incluyen el giro de un elemento en el seno del fluido, es decir, cilindros coaxiales, cilindros en medio infinito, otros elementos sumergidos (discos, - agujas, palas), cono-plato, esféricos y mixtos. fig. 2.10.

En estos instrumentos, las características - de esfuerzo cortante, gradiente de velocidades y viscosidad dependen totalmente de la concepción del aparato (potencia, capacidad de giro, robustez), siendo dificultoso modificarlas; al contrario de lo que sucede con los reo-

MARCA	MODELO	NORMA ASTM.	est.	ϕ mm.	L mm.	Volumen bulbo c.c.	Calibrado	APLICACION	NOTAS
CANON- FENSKE	OPACO 2' a 500	D115-68 D333-68 D445-65	0,5 a 10.000	0,31 a 4	73	1,6 a 4,3	Si Obtenible	Aceites, asfal- tos, cementos asfálticos, etc.	Tiempo de flujo mínimo 200 segundos 11 modelos Segundos SAYLBOT
KGP	UBBELOHDE DIN 2'-501		0,2 a 30.000	0,58 a 3,62	90	4 a 6	Si		15 modelos. Para medidas rápidas y en serie Ajuste de volumen automático. Camisa de termostato. Nivel esférico.
	UBBELOHDE ASTM 2'-25	D2515	0,3 a 30.000				Si		11 modelos. Para medidas rápidas y en serie Camisa de termostato. Nivel esférico. Ajuste automático de volumen.
	ASTM 24-526						No		11 modelos.
	CANON - FENSKE	24511	0,4 a 20.000	0,31 a 4	73		Si		Lavado luego de cada medición. 11 modelos. Tubo ascendente. Líquidos opacos. Determinación peso molecular para disoluciones de macromoléculas por viscosimetría.
	CANON - FENSKE	24513	0,4 a 20.000		73		Si		12 modelos. Medidas rutinarias Camisa termostato.
	OSTWALD	24509	0,3 a 10	0,3 a 0,7	100		No		5 modelos. Medidas rutinarias. Determinación del peso molecular en altos polímeros por viscosimetría. Camisa termostato.
VISCOMATIC FICA	UBBELOHDE OSTWALD								Medida de tiempo con cronómetro de cuarzo ($\pm 0,005$ s.) Termostato por camisa exterior (0-100 °C) Presión regulable. Automática. Programación de ensayos.
TECAM IV-4					30,5	12 a 0,7		Líquidos claros opacos, volátiles	Industrial Capilar horizontal
ZAHN	15-3485DA a 15-3495DE		hasta 2.000 cp.	0,2 - 5,3			No posible	Aceites, pinturas mezclas pesadas. Lacas	5 modelos. Tipo copa orificios cambiables. Accesorios de termostato. Segundos ZAHN
UBBELOHDE	13-(14A a 13-(14X	D445	2 a 10.000 cst.				Si	Productos petrolíferos	10 modelos. Segundos SAYLBOT

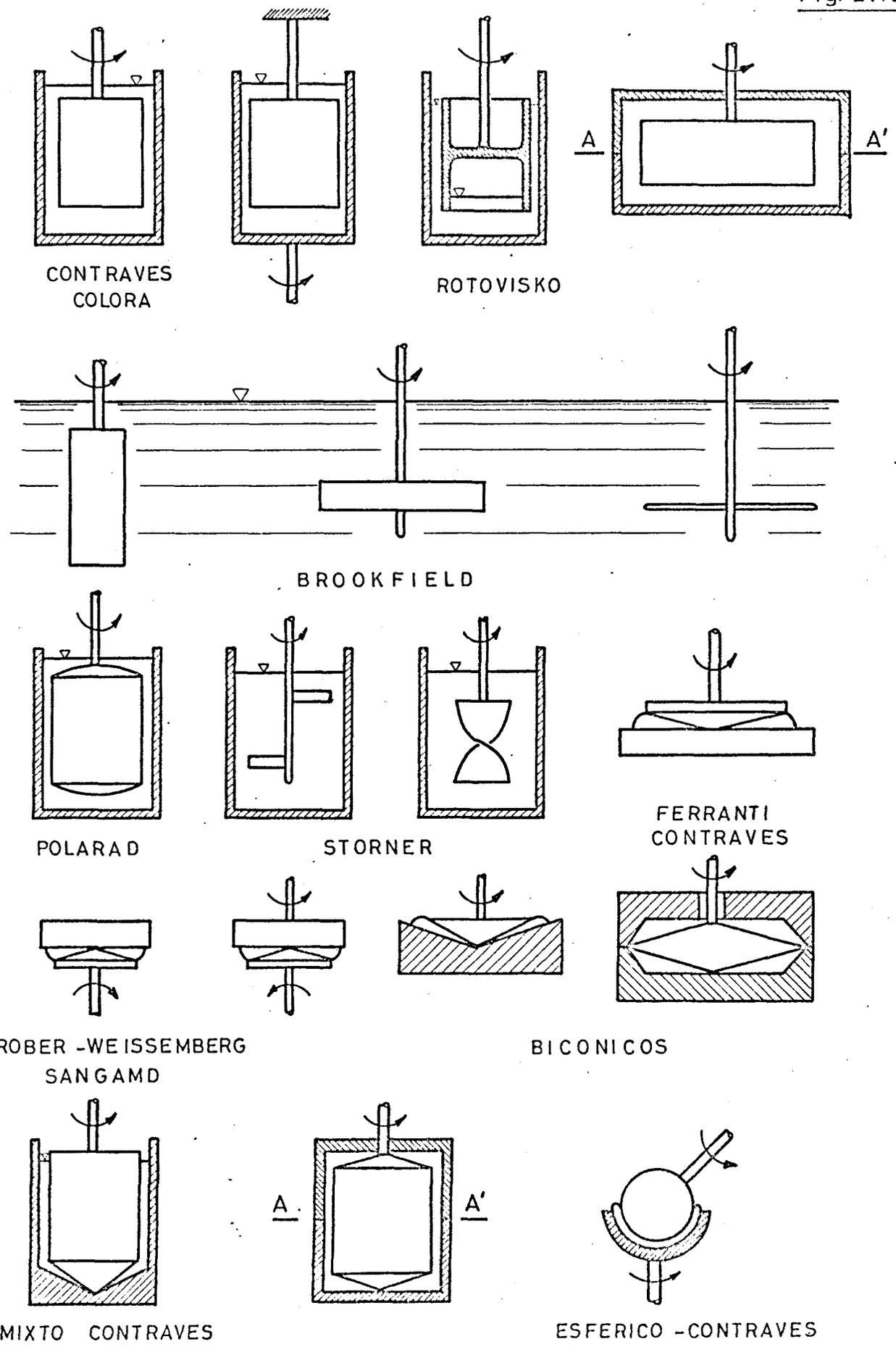
T A B L A II - 1 y 2
 (Continuación)

MARCA	MODELO	NORMA ASTM	cst.	β mm.	L mm.	Volumen bulbo c.c.	Calibrado	APLICACION	NOTAS
GARDNER	FORD SHERVIN- WILLIAMS ZHAN FUROL SAYBOLT	D 333-68 D 365-39 D 1200-70 D 816-55 D 1084-63 D 2641-675 D 88-56 D 115-68	20-1800 cst.				SI	Productos petrolíferos Pinturas Barnices	Copas Segundos SAYBOLT
KOHLER INSTRUMENT COMPANY	SAYBOLT K-220 a K-225	D 88	1-4000	1,76 a 3,15	12,2	60 ml.			Baños de termostato 8 modelos Orificios Universal, FUROL, KANSAS, ROAD, OIL
VISCOSIMETRO APARENTE	K-226	D 1092						Grasas	4 modelos 8 capilares, 3 termopares, 3 cámaras de grasa 4 válvulas. Termostato.
ENGLER	K-229	D 1605	1-1500	2,90 a 2,80	20	200 ml.		Productos petrolíferos Alquitranes	Grados ENGLER 4 modelos. Copa de oro, orificio platino. Termostato.
INSTRON			1-5.10 ⁻⁶	0,76 a 1,52	25,2 a 101,6	= 30 ml.			Reogramas. Registro gráfico. Funciona por extrusión. Control de temperatura. Capilares intercambiables. Velocidades variables.

NOTAS GENERALES

- El termostato en este tipo de viscosímetro suele ser exterior por inmersión del mismo.
- Cuando se incluyen normas ASTM se reduce la aportación de datos por estar explicitados en ellas y ser de uso específico.
- Casi la totalidad de estos viscosímetros pueden funcionar con una fuente exterior de presión y convertirse en capilares de alto gradiente de velocidad.

Fig. 2.10



VISCOSIMETROS ROTACIONALES - TIPO CILINDROS COAXIALES

NOMBRE	MODELO	$\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$	D seg ⁻¹	$\frac{\mu \text{ o } \rho}{\text{p-cst}}$	R.P.M.	TERMOSTATADO	NOTAS	APLICACION
CONTRAVES	RH-15		1,26-4000	0,01-129.10 ³ p.	5,59-352	hasta 300°	15 velocidades de rotación Registro gráfico. Accesorios varios	Programas Tixotropia
	RH-30	60-2,1.10 ⁶	1,1.10 ⁻² -3,9.10 ³	0,01-190.10 ⁶ p.	0,048-350	hasta 300°	30 velocidades de rotación Registrador gráfico	Programas Tixotropia Elasticidad
	TV.			0,01-1225 p.	200	NO		Dispersiones pulosas y fibrosas.
SECHFIELD	LVF LVT	6,75.10 ²	1,05.10 ⁻³	0-2000.10 ³ cp.	60-0,3	NO	Modelos con diversos accesorios Cilindro en medio infinito De 4 a 8 velocidades Bajas viscosidades. Pie móvil	Viscosidad Reología Portatil
	RVF RVT			0-8000.10 ³ cp.	0,5-100	NO	Idem Medios viscoelásticos	Idem Purés, pastas, Cremas
	HAF-HAT HEF-HET	5,75.10 ⁴	5,75.10 ²	0-56,000 10 ³ cp.	0,5-100	NO	Varios modelos y con diversos accesorios Cilindro en medio infinito De 4 a 8 velocidades Altas viscosidades	Idem
FERRANTI	PORTATIL VL VH			43-950 4,7-508	0-97 p 0-1460p	NO	5 velocidades. Coaxiales. Bajas viscosidades Conocido efecto de fondo 3 velocidades. Coaxiales. Altas viscosidades	Portatil Idem
	VISCOTESTER VT-180 VT-23 ROTOVISCO RV-3 RV-2 RV-1 AUTOVISCO AV. VISCOTESTER VT01 VT02	0-65.000 0-160.000 5-107	40-1000 5-125 10 ⁻² -10 ⁴ 5-300cp 1,5-330 30-400.000	0-600.000. 0-10 ⁷ cp. 1-10 ¹⁰ cp.	0,03-486		-30 + 150° -30 + 15°	2 velocidades Registrado x-y Cilindros y cono-plato

TABLA II - 5

VISCOSIMETROS ROTACIONALES - TIPO CILINDROS ROTACIONALES

NOMBRE	MODELO	$\frac{c}{cm}$ dinas	D seg ⁻¹	μ o v P cst	R.P.M.	VOLUMEN MUESTRA	UNIDADES MEDIDA	TERMOSTATADO	NOTAS	APLICACIONES	
FISCHER & POEZE	RHEOMAT			6.000 cp					Cilindro medio infinito	Proceso	
MAC-MICHAEL		0-4,55 10	2,14- 14,3	1-10.000 P.	10-38	14-185 ml.	grados M	Si	Concéntricos, giro exterior		
STORMER				10 ⁻¹ - 6. 10 ³ P	0-600		grados S		Velocidad constante o variación continua 5 rotores y 2 copas. ASTM-D562	Pinturas, esmaltes, fangos	
CONTRAVES	TO DO DC-30 DC-40D DC-40E DC-43 COVISTAT COVITHEM			CP, 4 1-10 ⁴ 0,4-1200 ⁵ 40-4,1.10 ⁵ 1-3,7.10 ⁴ 1-5,1.10 ⁴ 3.10 ³ _{4,5.} 10 cp						Funciona con un solo cilindro o dos Concéntricos en tuberías, Una o varias velocidades Dispositivos de medidas intercambiables. Trabajan a altas presiones (5-10 atm.) y tempera- turas (300°C)	Procesos, control

VISCOSIMETROS ROTACIONALES - TIPO CONO-PLATO Y ESFERICO

NOMBRE	MODELO	$\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$	$\text{seg}^{-1} \text{ D}$	$\mu \text{ p}$ cst.	R.P.M.	β	Vol. muestra	APLICACION	Angulo cono	UNIDADES MEDIDA	TERMOSTATADO	NOTAS
I.C.I.	VR-400 VR-402 VR-404		10.000-0	10		1" a 3/4"	1 ml.	Pinturas, resinas, aceites y otros.	1°	POISES	20 a 150° C	Maniobrabilidad.
FERRANTI SHIRLEY	UNICO	568.000-0	18.000-0	0,2 - 31.600	0-1000	3,5 a 1,1 cm.	0,6 ml.	Reógramas. Tixotropia. Reopexia. Viscosidad aparente. Tiempo de relajación. Tensión de fluencia. Líquidos y suspensiones. Sustancias volátiles.	25'	POISES	hasta 200° C	Juego intercambiable de conos (has- ta 8). Velocidad variable continuamente. Registrador gráfico D- tiempo. Robusto. Fácil limpieza y maniobra- bilidad. Muy automatizado. Autocon- trol distancia cono-plato. Aceleraciones y ganancias variables. Reómetro. Conos especiales forma y material.
SANGANO	A B C D	1,8.10 ⁻² 1,22.10 ⁷	7.10 ⁻³ 9.10 ³	10 ⁻³ 5.10 ⁷ p.	4,74.10 ⁻³ - 375	2,5 a 10 cm.		Viscosidad Tixotropia Relajación Características elásticas en general Líquidos a sólidos.	0,25-4°		-25 a 400° C	Mide esfuerzos normales Oscilación sinusoidal del plato Frecuencias disponibles 3,16 . 10 ⁻¹ 50 C.P.S. También funciona con cilindros con- céntricos Registrador x-y-tiempo Neogoniómetro
MLW	RHEOTESTZ KP	400-2.10 ⁶	5,6-480	8-4.10 ⁷ cp.	5/18-243		0,1 ml.	Reógramas Tixotropia.			-60 a 300° C	24 escalas de velocidad
CONTRAVES	STV-MS X RM-15-PH90		0,04-778	2,5 - 41.10 ⁷ cp.			0,11-2,04					Cuatro sistemas de medida 15 a 30 velocidades.
CONTRAVES	BALANZA REOMETRO			10 p hasta sólidos			5	Características elásticas y viscosos.			hasta 350° C	Recipiente hemisférico Velocidad de giro e inclinación ejes de deformación sustancia (0,0003125 Hz a 20 Hz)

la medida que realizan estos aparatos. Las tablas II.7 y 8 dan las aplicaciones, principios de funcionamiento y algunas notas de interés sobre ellos.

2.5.5. - CAMPOS DE APLICACION Y SINOPSIS DE CARACTERISTICAS

De las características de los equipos de reoimetría y de viscosimetría se deduce su campo de aplicación en la industria.

En el cuadro II.9 están representados los campos de utilización de los viscosímetros y reómetros comerciales según su principio de medida y las características dadas por el fabricante. En el cuadro se indican la extensión de gradientes de velocidad en segundos a la menos uno y de viscosidades equivalentes en poises y sus equivalentes en productos comunes en la industria, cubierto por cada tipo de aparato.

El cuadro es indicativo de la cobertura de las posibles zonas de trabajo por cada viscosímetro y el relevo que se produce en el principio de medida al pasar a otras zonas de trabajo. Sólo se han resumido los campos de aplicación de los reoviscosímetros estudiados con más detalle en este capítulo.

En los cuadros II.10, 11 y 12 se indican los diversos tipos de viscosímetros estudiados, según el ti-

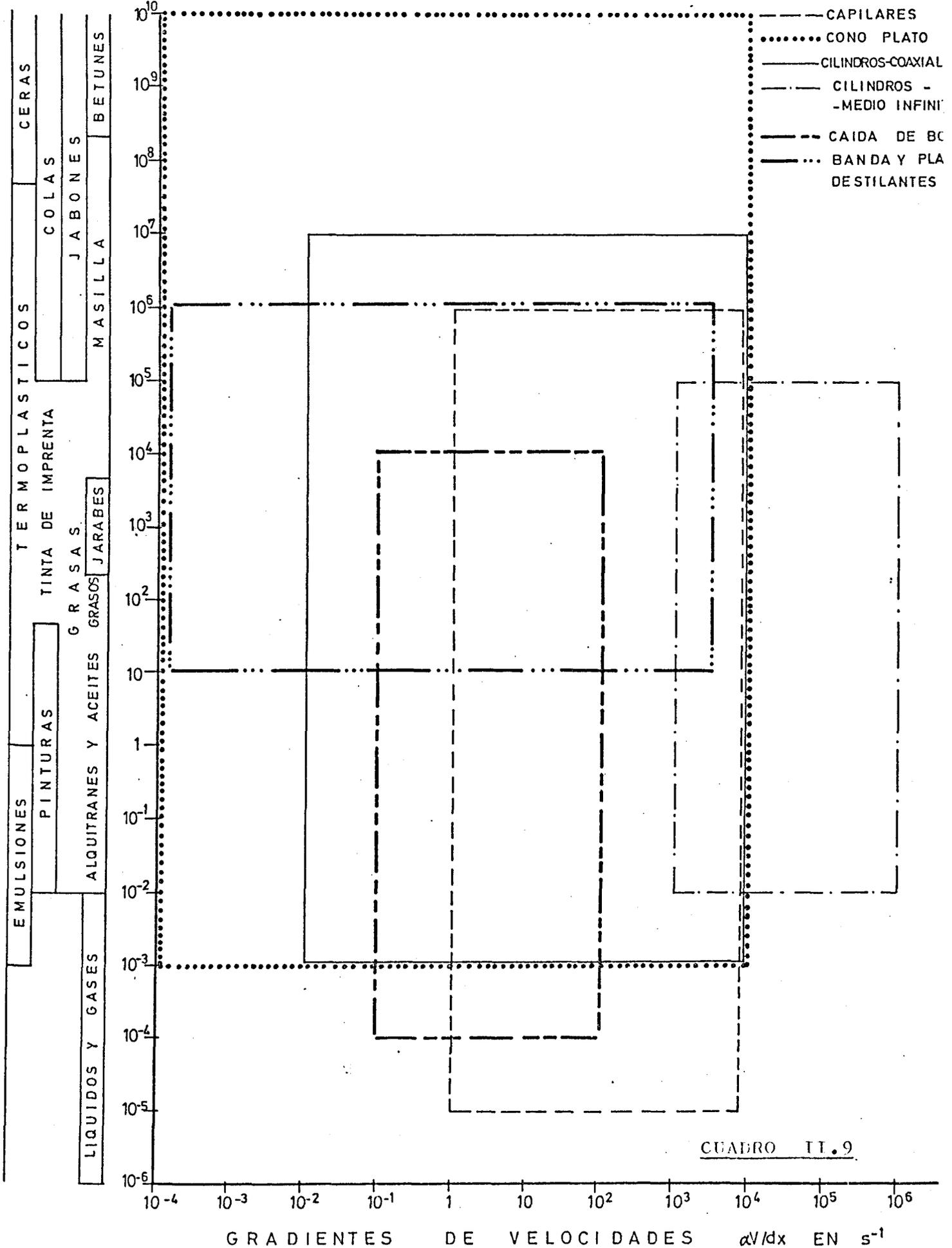
MARCA	MODELO	μ	NORMA	APLICACIONES	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	NOTAS
GARDNER	MICROVISCOMETER HG-9200 HG-9204			Plásticos, pinturas esmaltes.	Un disco con agujeros (51 de 1/16" ó 1/4") o sin agujeros se desliza a través de la muestra contenida en un cilindro.	
	Gel-time Lab-line penetrómetro		ASTM diversas	Bituminosos, grasas cera, hormigón vaselina, alquitrán	Un elemento cónico penetra en la masa de la muestra	
HAAKE	Caída de bola UR-7262 UR-7260 B-BH-CH	0.01 - 1.000000 cp.		Gases, éter, jabo- nes, alquitrán	Se mide el tiempo de caída de una bola en el seno de la muestra	Tubo ϕ 16 mm L 200 mm/m Inclinado 10° Termostatado -60 a 150°C
KOHLER INSTRUMENT Penetrómetro	K-195		ASTMD217	Grasas		Baño termostatado
FANN Consistómetro	5STOL			Lodos, cementos, fluidos	Se mide el tiempo de oscilación de un péndulo en el seno del fluido	Termostatado Altas presiones
GAERTNER	L 2100			Pastas de almidón, de papel	Principio de agitación y medida de par	Cambio velocidades. Registro gráfico. Termostatado
HAAKE	VISCOBALANZA V*3 V*3H VWB301 Consistómetro	0.01 - 10 cp. 10 ⁴ - 10 ¹³ - 10 ⁴ cp.		Viscosidades, re- sinas, líquidos Alquitranes, plás- ticos.	Varilla con bola en el extremo	Termostatado -60 a 150 °C y hasta 350 °C. Termostatado -60 a 350 °C
VISCONTROL	VA	3 a 6 5.10 cp.				Registro. Proceso
BRANDERS PLASTORAFIO PLASTICORDER				Geles, plásticos	Se produce un amasado de la muestra hasta producir un fundido de ésta.	Registro.

MARCA	MODELO	μ	NORMA	APLICACIONES	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	NOTAS
VISCORATOR	15F300 15B1735 15B1736 15A17300	0,4 a 300 cst. - 500 - 10.000 cp.			Un flotador indica el caudal y el otro la viscosidad en el flujo. Se mantiene el caudal constante. Se elimina la medida de caudal Solo el flotador	Medida intermitente. Dos flotadores. Temp. hasta 200 ° C. Trabajan a presión. Medida continua. Un flotador ° Registrador. Temp. hasta 230 ° C. Trabajan a presión. Registrador. Idem hasta 540 ° C.
BENDIX	ULTR-VISCOSON	0 a 50.000 cp.		Control mezclas (fuel, asfaltos) oxidación (asfaltos) producción (resinas polímeros) viscosidad (recubrimiento, impregnación tintes, lacas, barnices)	Se producen vibraciones que son filtradas por el fluido y recogidas por un sensor (magnetostricción). Se mide el coeficiente de amortiguación relacionado con la viscosidad del fluido.	Seis ondas. Computador y registrador. Cuatro ganancias. Hasta 200 ° C. Altas presiones.
HOPPLER MLV	DHL	0,6 - 80.000cp y más	DIN-33015 TGL053 015	Líquidos y gases	Caida de bola por gravedad Muestra 30 ml.	Seis bolas. Termostatado (-60 a 150 ° C). Inclinado 10°.
MLV	RHEOVISCO-SIMETRO	4-4.10 ⁶ cp.		Líquidos y pastosos	La bola va sujeta a un vástago balanza. El empuje la hace penetrar Muestra de 16 a 25 ml.	Termostatado (-60 a 120 ° C). Newtonianos y cualitativos de newtoniano. 5 vástagos.
MLV	CONSISTOMETRO	10 ⁴ -10 ¹² cp.		Muy viscosos alquitranes, grasas, masticables, cerámica.	Penetra una bola o una punta cónica según el empuje de la balanza. Muestra de 1 a 20 ml.	Tres varillas. Termostatado

NOTA.- Estos viscosímetros corresponden, en cierta manera, a la realización de un modelo del proceso a que está sometido el fluido. Su utilización más general es la de control de calidad, materias primas y fabricación. Solo el viscosímetro de caída de bola tiene teoría desarrollada para fluidos newtonianos. No se enuncian otros viscosímetros como los de burbuja, flujo telescópico, lámina de fluido, etc. por ser su uso más difundido y sus posibilidades muy específicas.

CAMPOS DE UTILIZACION DE LOS VISCOSIMETROS Y REOMETROS COMERCIALES SEGUN SU PRINCIPIO DE MEDIDA Y LAS CARACTERISTICAS DADAS POR EL FABRICANTE

VISCOSIDADES EQUIVALENTES POISES



CUADRO II.9

CUADRO VI - 10

TIPO	DESCRIPCION	ESQUEMA	TRABAJOS DE	ECUACIONES DE CALCULO	GRAD. VELOCID.	NORMAS	FABRICANTE O DENOMINACION INDUSTRIAL	PRINCIPIO DE LA OPEACION	APLICACIONES Y LIMITACIONES
CAPILAR	PRESION ESTACIONARIA O DE LIDRIO		OSTWALD THOMSON POISEVILLE HAGEN FEINER BUCKINGHAM RABINOWITZCH ROSEN MOONEY	VISCOSIDAD $\eta = \frac{4}{\pi} k \frac{V}{\pi R^4 \theta}$ $A = \theta (k + H) \cdot \frac{4}{\pi R^4} = \frac{4V}{\pi R^4 \theta}$	$\left(\frac{dh}{dt}\right) = \frac{4V}{\pi R^4 \theta}$	D445-53T D445-61	OSTWALD	El fluido circula desde un bulbo, de volumen conocido, a través del capilar hacia otro bulbo situado en la otra rama de un tubo en V. Accionado por la fuerza de la gravedad.	Bajo gradiente de velocidad. Varias dimensiones de capilar. Empleado para newtonianos.
				NEWTONIANOS $\mu = \frac{nR^4 \Delta P}{8QL}$ NO NEWTONIANOS LEY DE POTENCIAS $\mu = K \tau^{1-n}$ $Q = \frac{nR^3}{(n+3)K} \left(\frac{\Delta P R}{L}\right)^n$ EXPRESION GENERAL $\frac{4Q}{\pi R^4} = \frac{4}{\pi R^4} \int_0^{\tau_w} f(\tau) \tau^2 d\tau$ f(τ) = función reológica	$\tau_w = \frac{\Delta P R}{2L}$ $\tau_w = \frac{\Delta P R}{2L}$	D1092-88T D-1238	GARNON-FENSKE ZHUKOV MAIRING URBELOHDE CAMMON FITZ-SIMONS ATLANTIC ZEIFFICUS CROSS-ARM LAHTZ FISCHER-IRANY BLOOD	Idem. El bulbo, de volumen conocido, y el otro bulbo están en la misma vertical.	No hay corrección de verticalidad. Longitudes y diámetros del capilar variables. Para fluidos newtonianos, opacos, transparentes. Industrial y
CAPILAR	PRESION EXT.		OSTWALD THOMSON POISEVILLE HAGEN FEINER BUCKINGHAM RABINOWITZCH ROSEN MOONEY	VISCOSIDAD $\eta = \frac{4}{\pi} k \frac{V}{\pi R^4 \theta}$ $A = \theta (k + H) \cdot \frac{4}{\pi R^4} = \frac{4V}{\pi R^4 \theta}$	$\left(\frac{dh}{dt}\right) = \frac{4V}{\pi R^4 \theta}$	D445-53T D445-61	OSTWALD	El fluido circula desde un bulbo, de volumen conocido, a través del capilar hacia otro bulbo situado en la otra rama de un tubo en V. Accionado por la fuerza de la gravedad.	Bajo gradiente de velocidad. Varias dimensiones de capilar. Empleado para newtonianos.
				NEWTONIANOS $\mu = \frac{nR^4 \Delta P}{8QL}$ NO NEWTONIANOS LEY DE POTENCIAS $\mu = K \tau^{1-n}$ $Q = \frac{nR^3}{(n+3)K} \left(\frac{\Delta P R}{L}\right)^n$ EXPRESION GENERAL $\frac{4Q}{\pi R^4} = \frac{4}{\pi R^4} \int_0^{\tau_w} f(\tau) \tau^2 d\tau$ f(τ) = función reológica	$\tau_w = \frac{\Delta P R}{2L}$ $\tau_w = \frac{\Delta P R}{2L}$	D1092-88T D-1238	GARNON-FENSKE ZHUKOV MAIRING URBELOHDE CAMMON FITZ-SIMONS ATLANTIC ZEIFFICUS CROSS-ARM LAHTZ FISCHER-IRANY BLOOD	Idem. El bulbo, de volumen conocido, y el otro bulbo están en la misma vertical.	No hay corrección de verticalidad. Longitudes y diámetros del capilar variables. Para fluidos newtonianos, opacos, transparentes. Industrial y

NOTA: En todos los casos la determinación indirecta del reograma.

Amplio campo de gradientes de velocidad y de cortaduras. Newtonianos y no-newtonianos. Se aplican correcciones. Registro gráfico.

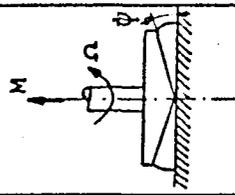
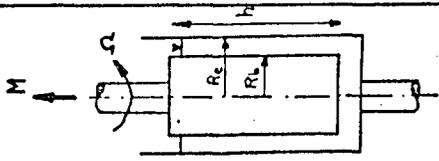
Newtonianos. Emplea vacío y presión. Idem TÉCNIC-PRINTING. Newtonianos. Prepara diluciones solo. Impresora.

Varias relaciones L/D del capilar. No-newtonianos y newtonianos. También viscoelasticidad lineal.

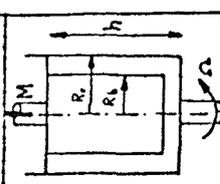
Newtonianos, no-newtonianos. Altos gradientes de velocidad. Análogo Bingham.

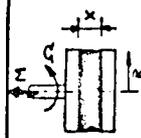
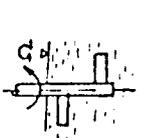
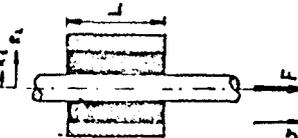
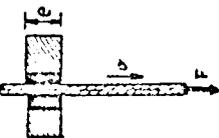
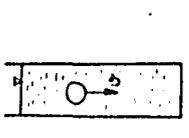
NOTA: En todos los casos la determinación indirecta del reograma.

TIPO	DENOMINACION	ESQUEMA	TRABAJOS DE	ECUACIONES DE CALCULO		NORMAS ASTM	FABRICANTE O DENOMINACION INDUSTRIAL	PRINCIPIO DE LA OPERACION	APLICACIONES Y LIMITACIONES
				VISCOSIDAD	GRAD. VELOCID. COSTADURA				
CAPILAR	ORIFICIO		SAYBOLT BARREY ENGLER GARDNER ETC.	$\mu = K\theta$		D1200-58 D 88 D333-60	PRATT-LAMBERT BARREY ENGLER DEHLLER FORD GARDNER MARSH REDWOOD SAYBOLT UNIV. SAYBOLT FUROL. SCOTT ZAVIN COX SHELL ASTM PARLIN GOTTSCHE	En general constan de un recipiente con un orificio. Se mide el tiempo de vaciado de un cierto volumen.	No son medidas absolutas. En Metronianos se pueden establecer relaciones entre medida de tiempo y viscosidad. Empleados para control en petrolio y derivados, pinturas, lacas, barnices, lodos. Tambien como medida no absoluta.

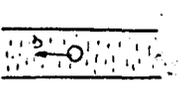
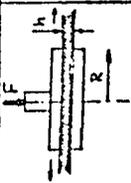
TIPO	DEMONINACION	ESQUEMA	TRABAJOS DE	VISCOSIDAD	EQUACIONES DE CALCULO CORTADURA	GRAD. VELOCID.	NORMAS ASTM	FABRICANTE O DENOMINACION INDUSTRIAL	PRINCIPIO DE LA OPERACION	APLICACIONES Y LIMITACIONES
	CONO-PLATO		HIGGIBOTHAM PIPER SCOTT HASKOVITZ Mr. KENNELL	$\mu = \frac{3M/2\pi R^3}{\Omega/\psi}$	$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3}$	$-\left(\frac{d\psi}{dt}\right) = \frac{\Omega}{\psi}$		FERRANTI-SHIPLEY WEISSENBURG HAAKE-ROTOVISCO I.C.I. BROOKFIELD CONTRAVES	Plato estacionario. Varios conos. Control distancia vértice como a plato 0,5 ml de muestra. Varias velocidades crecientes en varios tiempos. Como fijo, varios ángulos y radios. Gira plato. Varias velocidades. Pequeña muestra movimientos oscilatorios posibles Gira cono, plato quieto. Varios conos. Un solo cono. Pequeña muestra. Para bajos gradientes de velocidad. Análogo al TEROVISCO.	Focas correcciones. Fluidos newtonianos y no-newtonianos. Estudios isotropia. Bueno para altos gradientes de velocidad. No utilizable con suspensiones. Fácil utilización. Registro gráfico. Fluidos newtonianos y no-newtonianos. Altos gradientes de velocidad. Estudios viscoelásticos. Fluidos newtonianos y no-newtonianos. Altos gradientes de velocidad. Limitado. Adaptado al rotacional LVT. Varios modelos.
	CILINDRO INTERIOR MOVIL		COVETTS SEARLE SOTNER MATSHEK	$\mu = \frac{M}{4\pi h \Omega} \cdot \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right)$ caso newtoniano	$\tau = \frac{M}{2\pi r^3 h}$	$-\left(\frac{d\psi}{dt}\right) = \frac{\Omega}{\psi} \cdot \frac{2}{\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}}$		ROTOVISCO CONTRAVES MIECHAT BRUSHOMETER HERRILL-PROOFIELD STORER HERCULES GEMCO FAHN	Varios juegos cilindro-conca Varias velocidades Final del cilindro cónico. Varios juegos. Varias velocidades. Análogo a los anteriores Análogo. Variación continua de velocidad. Uno de sus accesorios se puede considerar cilindros coaxiales. Movimiento a 1/2-cte. Análogo. Variación continua de velocidad. May simple. Final de cilindro cónico. Semejante al STORER Gama completa de viscosidades. Velocidades de variación continua, rango de tiempo, movimiento constante, etc	Fluidos newtonianos y no-newtonianos. Tixotropia. Difícil evacuación de celdas a altas velocidades. Correcciones. Posible registro gráfico según modelo. Análogo ROTOVISCO. Varios modelos. Correcciones. Análogo. Bajos gradientes de velocidad. Correcciones. Análogo. Registro gráfico. Correcciones Posible medidor de tiempo estroboscópico. Varios modelos y variantes específicas. Correcciones. Registro gráfico simple. Correcciones. Limitado. Demostrativo. Según modelos y necesidades. Gama completa. Registro gráfico. Correcciones.
				<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p>EXPRESION GENERAL</p> $\Omega = \frac{1}{2} \int_{\psi}^{\tau} f(\tau) \frac{d\tau}{\tau}$ </div> <p>f(τ) = función reológica</p>						

CUADRO II. 21

TIPO DE NOTACIONES	RECOMENDACION	ESQUEMA	PARAJOS DE	EQUACIONES DE CALCHILLO		NORMAS ASTM	PARTICANTE O DEMONSTRACION INDUSTRIAL	PRINCIPIO DE LA OPERACION	APLICACIONES Y LIMITACIONES
				VISCOSIDAD	GRAD. VELOCID.				
NOTACIONES	CILINDRO O COPA EXTERNO MOVIL					D15-55	EMILIA RHEOTEST BRUSHOMETER FERAMIT Mac. MICHAEL INTERCHEMICAL	Análogo a FOTOFISCO y CONTRAVES simples Análogo ROTOFISCO y CONTRAVES También cono-placa Varios juegos cilindros. Varias velocidades.	Limitado Varios modelos. Correcciones Efecto de fondo o final eliminado. No rotulato. Correcciones. Todos aplicables a fluidos newtonianos no-newtonianos y viscosos lineales. Posibilidad de ampliar características con movimientos oscilatorios.

TIPIC	DENOMINACION	ESQUEMA	TRABAJO DE	VISCOSIDAD	ECUACIONES DE CALCULO CORTADURA	GRAD. VELOCIDAD	NORMAS ASTM	FABRICANTE O DENOMINACION INDUSTRIAL	PRINCIPIO DE LA OPERACION	APLICACIONES Y LIMITACIONES
ROTACIONALES	DISCO			$\mu = \frac{M}{R} \frac{2x}{nR^2}$	$\tau = M r \left[\frac{2}{nR^2} \right]$	$-\frac{dv}{dx} = \omega \cdot \frac{r}{x}$		BROOKFIELD	Un disco gira a una distancia x de otro, cizallando el fluido entre ellos contenido.	Tipo de medida aproximada para newtonianos, arbitraria para no newtonianos.
	PALETAS						D562-55	STORNER	Se agita el fluido contenido en un recipiente normalizado.	Se aplica en el control de todos de perforación. Medida arbitraria. Otros tipos trabajan con agujas.
FLUIDO AXIAL	CILINDROS CONCENTRICOS		SEGL POCHETTINO SMITH BIXERMAN	$\mu = \frac{F}{2nL\omega} \frac{R_2}{R_1}$	$\tau = \frac{F}{2nLR_1}$	$\left(\frac{dv}{dr} \right) = \frac{\omega}{R_1} \frac{R_2}{R_1}$	D217 D937 D 5	LARAY BAK PENETROMETRO IDEM PRECISION (LAB LINE) CLARVOE MOBILOMETER	Se mide fuerza y velocidad en: Un cilindro desliza por el interior de otro Un cilindro desliza por el interior de otro Un cilindro penetra en el interior del otro Este sustituye el cilindro por una forma cónica. Mixto entre penetómetro y caída de bola. Penetra un disco perforado	Puede estudiar no-newtonianos Termostataado
	BAJADA (PLACAS PARALELAS)		VACHHOLTZ ASBECK HULL ZETTEMAYER COZZEN	$\mu = \frac{F}{\omega} \frac{x}{2eL}$	$\tau = \frac{F}{2eL}$	$\frac{dv}{dt} = \omega$		NPIRI HALLIKAINEN INSTRUMENTS	Una banda pasa por una rendija cizallando el fluido Se mide el esfuerzo y la velocidad. Dos placas paralelas deslizan una sobre otra.	Se emplea para fluidos no-newtonianos Medida electronica del tiempo. Termostataado. Registreado gráfico. Micrometro y servomotor. Termostataado. Se utiliza en tintes de imprenta
	CAIDA DE ESFERA		STOKES OSEEN GOLDSTEN ZIMAN FAXEN BACON LEE LAND KANDS otros		$\mu = \frac{2}{9} \frac{(r-r_1)g}{\omega}$ en STOKES		$-\frac{dv}{dt} = \omega \left[\frac{3}{2r} \theta \right]$	D1343-56 D365-39 D871-56	HOEPLER RUSKA	Se mide el tiempo de caída de una bola en el seno del fluido.

CUADRO II. 12 (Continuación)

TIPO	DENOMINACION	ESQUEMA	TRABAJOS DE	ECUACIONES DE CALCULO		NORMAS	FABRICANTE O DENOMINACION INDUSTRIAL	PRINCIPIO DE LA OPERACION	APLICACIONES Y LIMITACIONES
				VISCOSIDAD	CORTADURA				
FLUJO AXIAL	BURBUJA		STOKES			DL545-58T	GARDNER-HOLDT GARDNER-VERTICAL INTERCHEMICAL COLLINS STEINER R.P.C.	Se mide el tiempo de ascenso de una burbuja en el seno del fluido contenido en un tubo Tubo inclinado	Fluidos newtonianos Medida comparativa Empleado en Europa
FLUJO RADIAL	DISCO		DIENES KLEMEN					El fluido situado entre dos discos paralelos que se aproximan es desplazado radialmente Se mide desplazamiento del disco.	Puede estudiar no-newtonianos cambiando el valor de la fuerza

po de flujo, la denominación más frecuente, los autores que han trabajado y colaborado en el desarrollo del aparato, las ecuaciones de cálculo de la función reológica, de la viscosidad, del esfuerzo cortante y del gradiente de velocidades, normas que siguen, fabricante o denominación industrial, principios de la operación de medida y aplicaciones y limitaciones del aparato (1,2,3,4,7,11,12,13,14,15,29,30,31,32,33,34,35,36,37,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,54).

2.6. - ESTUDIO DEL REOVISCOSIMETRO FERRANTI

2.6.1. - INTRODUCCION

En el anejo B se describe el aparato y su funcionamiento. De sus características se deduce que es uno de los instrumentos más potentes del mercado para el estudio de fluidos puramente viscosos de características dependientes e independientes del tiempo (ver apartado 2.5 de este capítulo), poniendo también en evidencia aspectos del comportamiento viscoelástico.



Su limitación se encuentra en el estudio de suspensiones groseras (el huelgo entre el cono y el plato no permiten partículas de gran tamaño). Para algunas suspensiones, se puede emplear el aparato provisto de los conos sin vértice al efecto, quedando el instrumento limitado en sus aplicaciones, ya que, para grandes velocidades, se produce una separación de las partículas en la suspensión. El gradiente de velocidades en el seno del fluido hace aparecer una diferencia de fuerzas viscosas entre un lado y otro de la partícula en suspensión, creándose un par que provoca un momento giroscópico de ésta y ocasionando una deriva en su trayectoria que la lleva al centro del cono plato, pudiendo otras ser centrifugadas al exterior. Alcanzada esta disgregación, la medida se realiza sobre el fluido de base o portador. El fenómeno de disgregación es más rápido cuanto más velocidad lleva el fluido, es decir, cuando aparecen gradientes de velocidad mayores.

En este estudio de fluidos pseudoplásticos, - tomando como modelo las soluciones polímeras en agua, se ha realizado una serie de experiencias para evidenciar - las características de precisión, calidad, etc. del aparato y de las medidas con él realizadas.

Se ha de indicar que este reoviscosímetro co no plato se vende como un aparato de aplicación industrial, aunque por sus características generales de funcionamiento se emplea en la investigación. Dado el grado de precisión de los trabajos actuales en esta rama de la ciencia, sus medidas, que pueden presentar errores relativamente elevados (5% y más), se consideran de gran calidad, ya que el poco desarrollo de esta tecnología y la falta de normalización reológica en los aspectos de medi da, control, cálculo y preparación lleva a resultados - con márgenes de error del 15% y mayores. A título compa rativo, basta sólo recordar el error admisible en el cál culo de pérdidas de carga en una tubería por la que circula un fluido newtoniano, o los de selección de una bom ba y más cuando las previsiones son para funcionamiento en regímenes variables, caso frecuente en procesos.

El estudio que a continuación se presenta - tiene una doble finalidad :

- 1) - Saber el grado de precisión del trabajo realizado y, por lo tanto, las características del aparato.
- 2) - Marcar una pauta en la determinación de la calidad de las medidas en equipos reométricos no normalizados.

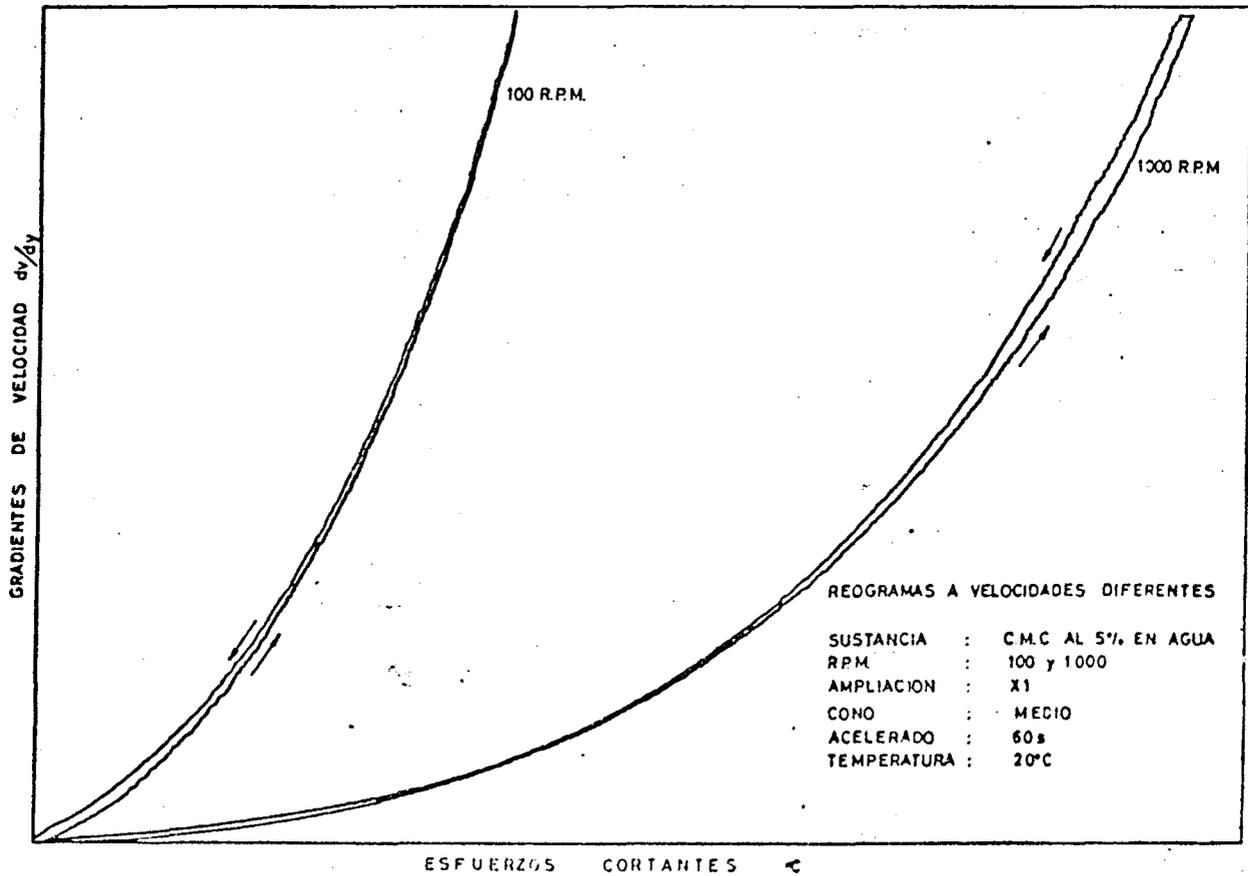
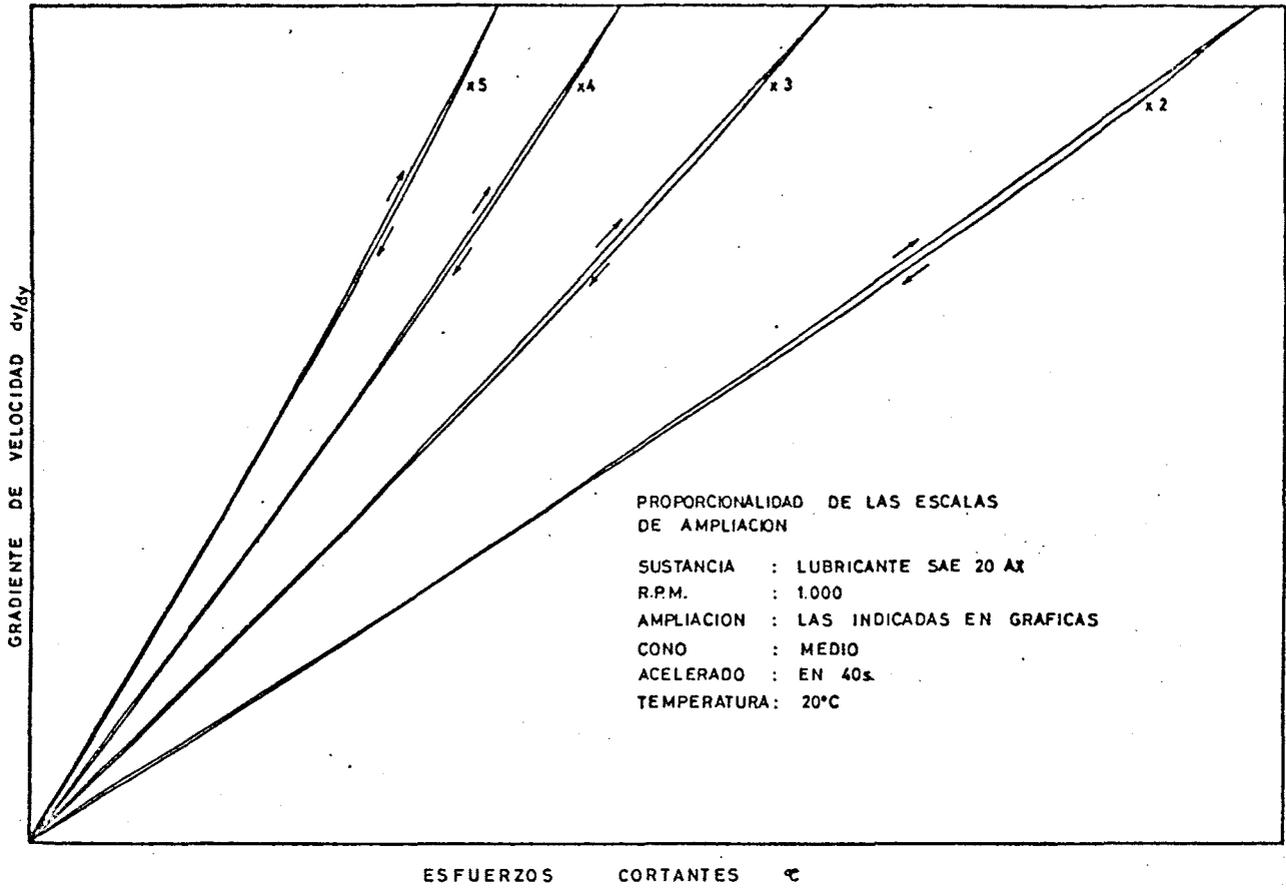
Se estudian aspectos inherentes al fluido, a la geometría del aparato y al equipo de amplificación y de control, tales como :

- 1) - Calidad del termostatado.
- 2) - Efectos de los cambios de escala de ampliación.
- 3) - Bucles aparecidos en los reogramas (fig. 2.11).
- 4) - Camino seguido al trazar el reograma.
- 5) - Efecto de la distancia cono-plato.
- 6) - Fenómenos de inercia en el equipo y otras peculiaridades (picos de reograma, centrifugado).

2.6.2. - CALIDAD DEL TERMOSTATADO Y EFECTOS DEL CAMBIO DE ESCALA

El motivo de presentar conjuntamente el estudio de calidad del termostatado y efectos de cambio de escala de ampliación, se debe, a lo muy ligados que se presentan ambos efectos, a través del reograma y a la existencia de cierta correlación entre ambos, como se observa en este apartado.

Es bien conocida la incidencia de la temperatura en las medidas viscosas. Un mal termostatado, ya sea por falta de calorifugado o por mala evacuación del calor, es frecuente en los reómetros al no considerar -



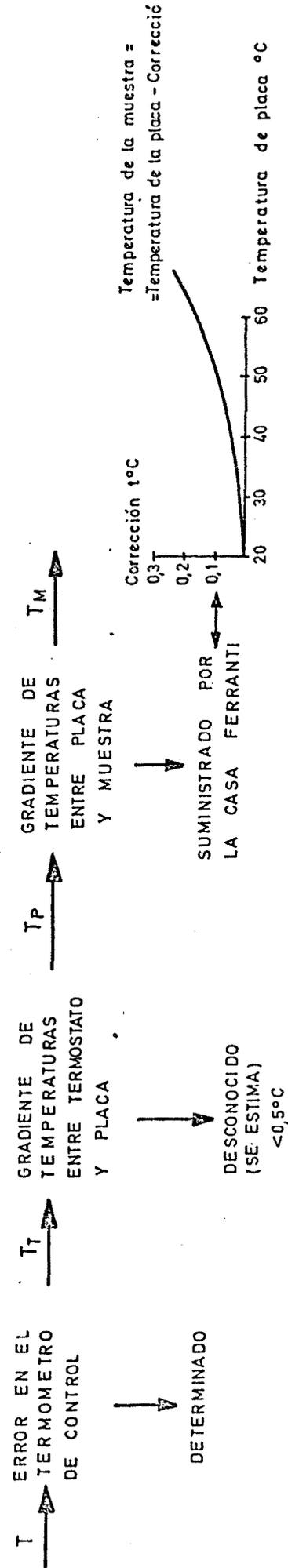
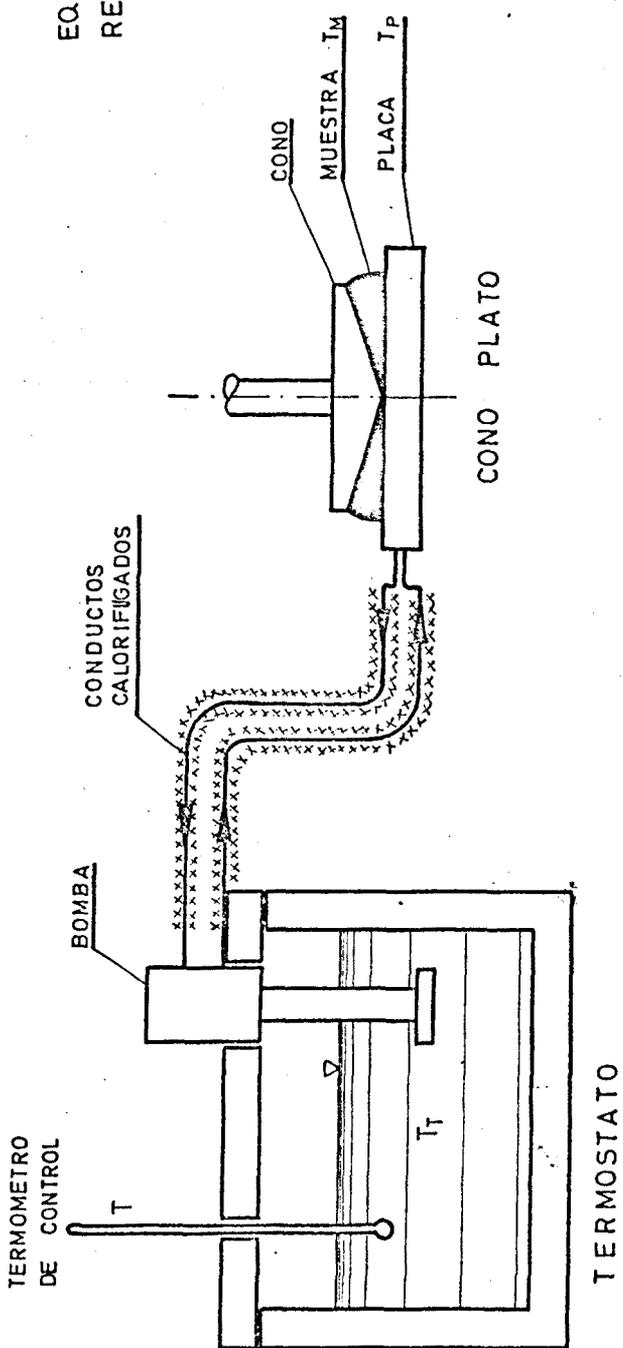
que el gradiente de velocidades genera calor en el interior del fluido e impide obtener calidad en un estudio de diversas temperaturas. (Apartado 2.2 y 2.3 de este capítulo).

El equipo de termostatado del reoviscosímetro FERRANTI, esquematizado en la figura 2.12, consta de un termostatado VEB-PRUFGERATE - TIPO U10 con una exactitud de regulación de $\pm 0,02$ °C entre las temperaturas de servicio de 15 a 80 °C, bomba impulsadora, capacidad 6 l/minuto, mangueras calorifugadas con manga de amianto de 1 cm. de espesor, plato con conductos laberínticos sin calorifugar y con el que está en contacto la muestra.

La exactitud de regulación del termostatado es conocida, $\pm 0,02$ °C, pero sus indicaciones en el termómetro de control son erróneas (función del termómetro que se emplee). Se han contrastado las indicaciones de este termómetro de control con otro calibrado de precisión, observándose entre ambos las diferencias indicadas en la fig. 2.13. La discontinuidad de la curva de errores es indicativa de variaciones de diámetro en el capilar. Con este sistema de contrastación se ha determinado el error en la lectura de la temperatura y primero en la serie de errores de medida de temperatura (fig. 2.12.).

Aunque el calorifugado de la manguera está bien realizado, se presentan puntos de fuga (puentes térmicos) en la conexión a la bomba, en la conexión al plato y en el mismo plato que transmite calor a su entorno y a su soporte, el cual se encuentra refrigerado por agua a temperatura ambiente (≈ 15 °C) y aire. No es posible

EQUIPO DE TERMOSTRATADO DEL REOVISCOSIMETRO FERRANTI



La corrección suministrada para la diferencia de temperaturas entre la placa y la muestra por la casa FERRANTI dentro del campo de trabajo, menor de 60°C, es siempre menor de 0,3°C

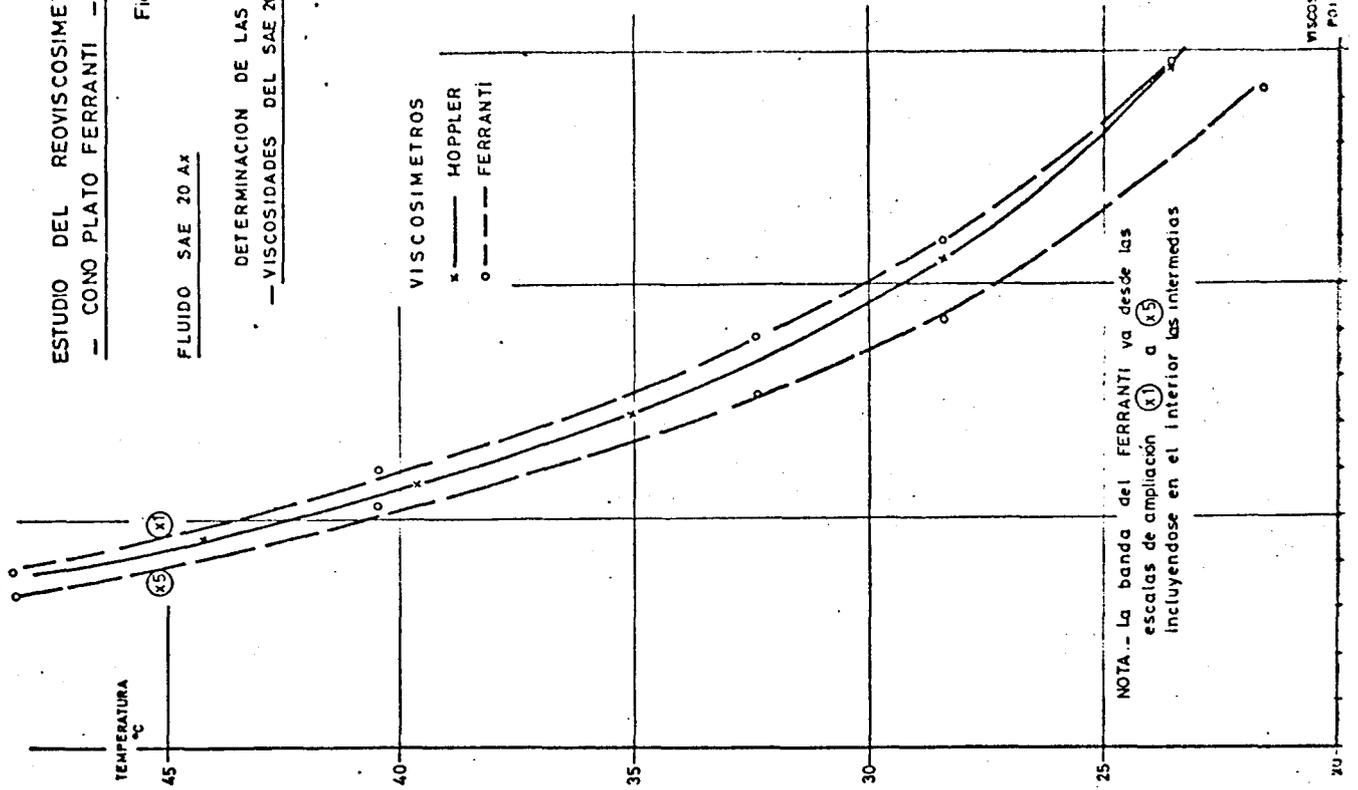
ESTUDIO DEL REOVISCOSIMETRO
— CONO PLATO FERRANTI —

Fig 2.14

FLUIDO SAE 20 AX

DETERMINACION DE LAS

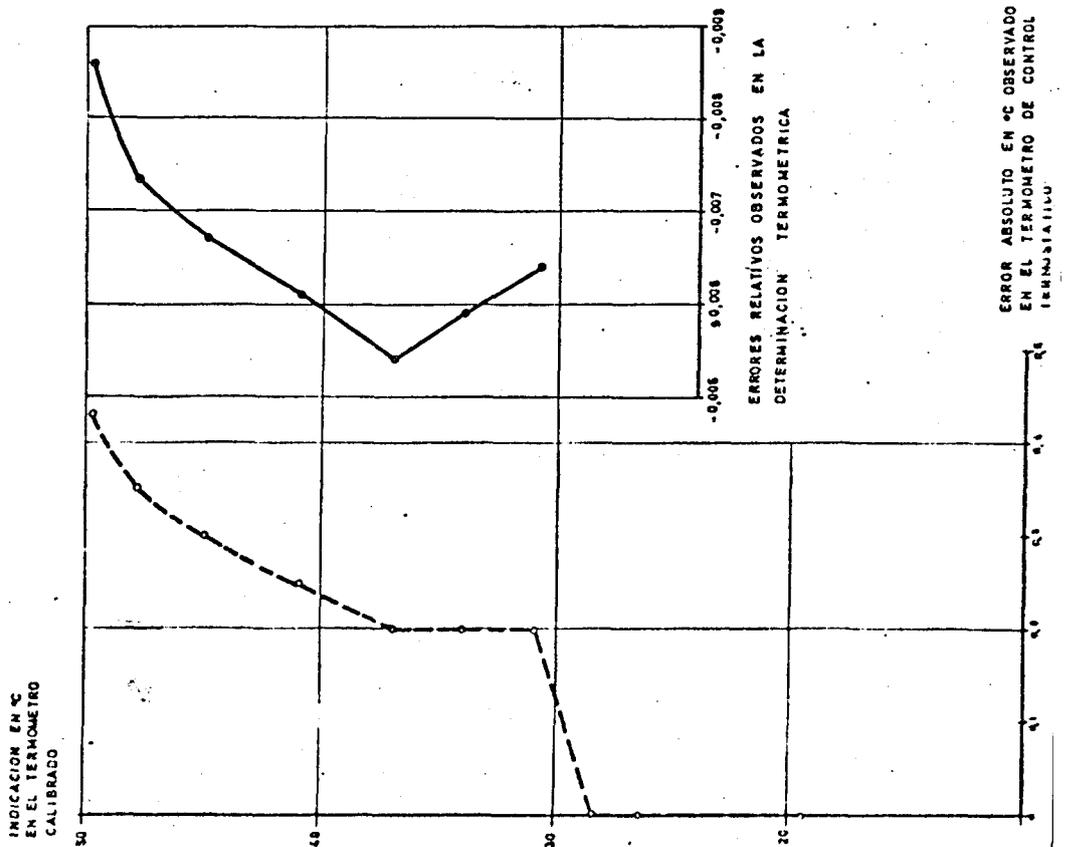
— VISCOSIDADES DEL SAE 20 AX —



— ESTUDIO REOVISCOSIMETRICO CONO PLATO FERRANTI —

Fig. 2.13

ERRORES EN EL TERMOMETRO DE CONTROL DEL TERMOSTATO



la determinación directa de la variación de temperaturas en esta parte de la instalación, por lo que se ha empleado un método indirecto para estimar su valor.

El método indirecto ha consistido en realizar el estudio de un fluido newtoniano, SAE 20 AX, en un viscosímetro HOPPLER de caída de bola (precisión BH según - DIN 53015), con un error máximo en la medida del 2%, y - compararlo con el estudio del mismo fluido en el FERRANTI.

Para la determinación de las densidades se - ha empleado la balanza KERN densimétrica Nº 203/2 de gran precisión. Los tiempos se han medido con un error menor de 0,5%, sobre un valor mínimo de 40 s. (error relativo máximo 0,01). Se puede suponer que los errores cometidos en las determinaciones viscosimétricas en el HOPPLER son inferiores al 2%.

Con el reoviscosímetro FERRANTI se han realizado una serie de reogramas a 100 y 1000 r.p.m., empleando el cono medio (el campo de gradientes de velocidades cubierto ha sido de 0 a 17.600 s^{-1} y el de esfuerzo cortantes de 0 a $500.000 \text{ dinas/cm}^2$). En casi todas las muestras se han utilizado cinco escalas de ampliación y tiempos de aceleración de 60, 40, 20 y 10 segundos, realizándose algunos ensayos con tiempo de aceleración de 600 - seg. Este conjunto de reogramas ha permitido estudiar :

- 1) - las viscosidades del fluido.
- 2) - la influencia de la ampliación.

- 3) - la influencia de la velocidad máxima.
- 4) - la influencia del tiempo de ensayo.

El conjunto de resultados de viscosidad se representa en la figura 2.14.

En esta comparación falta introducir el error de lectura termométrica en el termostatado y el efecto de calentamiento de la muestra al cizallarla, dato que suministra el fabricante del FERRANTI (fig. 2.12). Según WILKINSON, la corrección de temperaturas por causa de la cizalladura del fluido se debe considerar a partir del gradiente de velocidades 70 s^{-1} . El FERRANTI normalmente trabaja muy por encima de este valor.

En realidad, la muestra no puede presentar una temperatura uniforme pues recibe o disipa el calor fundamentalmente por el plato, pudiéndose hacer también por el cono y la periferia (fig. 2.15).

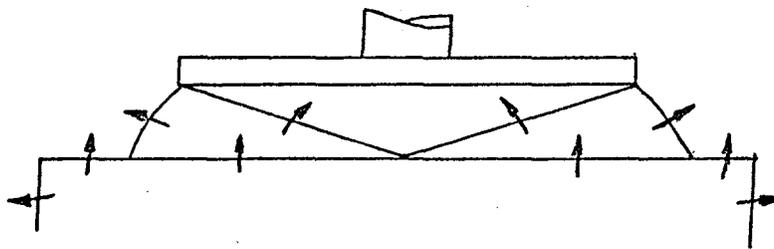


Figura 2.15.

Para fluidos volátiles, debe ser importante el gradiente térmico en el borde, dadas las posibles evaporaciones. En este sentido se ha de procurar que la

muestra repose cierto tiempo en el cono-plato para homogenizar las temperaturas antes del ensayo y al mismo tiempo evitar al máximo la evaporación.

Diversos autores han estudiado el incremento de temperatura que puede sufrir la muestra al estar sometida durante cierto tiempo a cizalladura (CARSON, JAEGER) obteniendo :

$$\Delta T (\text{°C}) = \frac{R \psi H}{k} \left(\frac{\omega t}{\pi} \right)^{1/2} \text{°C}$$

(ver apartado 2.3.3. de este capítulo).

M. KENNEL para el FERRANTI da :

$$H = \frac{3,58 \cdot 10^{-8} \cdot M \cdot \omega}{\pi R^3 \psi}$$

Nuestras observaciones se han reducido a determinar la energía "encerrada" en las bandas de los regramas del fluido newtoniano (se estudio en el apartado siguiente) y realizar ensayos con cizalladuras con duraciones diferentes. Así, en los ensayos de 60 segundos y 600 segundos de duración, no se observa diferencias de viscosidad como consecuencia de variar la temperatura durante el ensayo. Si se mantiene una velocidad de giro y, después de cierto tiempo, se realiza el ensayo, tampoco hay variaciones apreciables debidas a calentamientos.

Luego de estas observaciones se ha introducido la corrección dada por el fabricante, que es función de la temperatura del ensayo (fig. 2.12.).

Observándose los resultados viscosimétricos del FERRANTI y del HOPPER se aprecia que, supuestas como exactas las observaciones de HOPPER :

- Las escalas de ampliación bajas del FERRANTI dan los errores mínimos, siempre que sea posible utilizarlas - (por este orden x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5). Esto permite conseguir la máxima precisión (errores posiblemente debidos a la explotación de gráficas, error óptico).
- Los reogramas obtenidos en igualdad de condiciones variando solamente las escalas de ampliación coinciden perfectamente, previa transformación (fig. 2.12).
- La variación del tiempo de acelerado o de ensayo introduce oscilaciones aleatorias en la medida de la viscosidad.
- El error máximo observado en la viscosidad y dentro del cual se encuentran los de FERRANTI para el SAE 20 AX, equivale a variaciones de $2 \text{ }^\circ\text{C}$ a $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ como máximo y mínimo, lo que supone un error máximo del 10% en la medida de la viscosidad. Esto para los valores obtenidos empleando cualquier escala de ampliación.
- El error máximo observado para la escala de ampliación mínima empleada, x_1 en este caso, es de $1 \text{ }^\circ\text{C}$, es decir, de un 3% en la medida de la viscosidad.
- De los resultados obtenidos al aplicar las diversas escalas de ampliación, y supuestos exactos los obtenidos con la ampliación mínima x_1 , se ha observado un mejor comportamiento de la x_3 (en la fig. 2.16 sólo se indica las temperaturas y gráficas extremas del estudio).

- Se observa una mayor dispersión de las medidas de viscosidad para las temperaturas bajas, posiblemente debido a la inestabilidad en la actuación, de los controles del equipo a estas temperaturas próximas a la del medio ambiente.

2.6.3. - BUCLAS QUE SE PRESENTAN EN EL REOGRAMA Y RECORRIDO DE LOS MISMOS

En general, al trazar el reograma de un fluido, se observa la aparición de un bucle o ciclo de histéresis, no existiendo, por lo tanto, superposición de los caminos de subida y bajada. En principio, se puede interpretar el bucle como un fenómeno de tixotropía o reopexia en el fluido ensayado. Esta interpretación es realmente errónea y puede verificarse su no validez en el ensayo de tixotropía del fluido con el mismo equipo reoviscosímetro FERRANTI.

El bucle formado puede ser de diversos tamaños, en cuanto a superficies, y de varias formas (fig. 2.17).

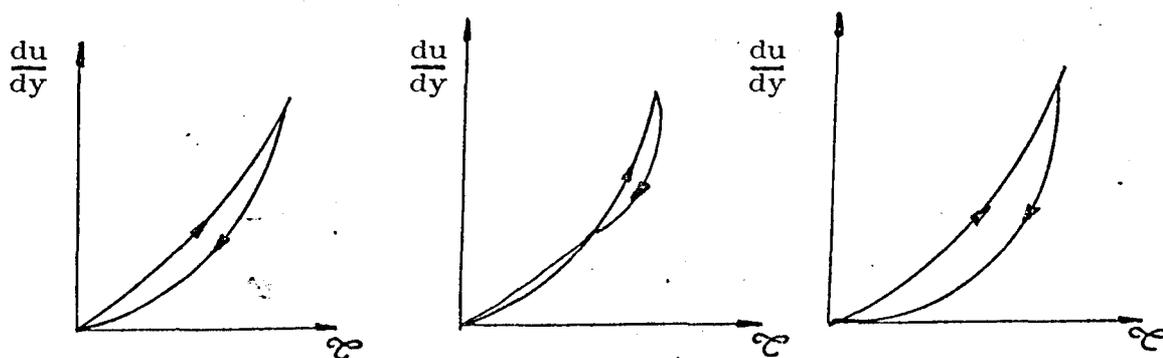


Figura 2.17.

Para el estudio de este fenómeno se ha tomado como fluido el SAE 20 AX, sustancia lo suficientemente conocida y simple que nos permite aislar el fenómeno (fig. 2.11).

Los diversos bucles han sido planimetrados y se dan sus superficies, en cm^2 , en la tabla II.13.

De esta tabla se deduce que :

- a temperatura y tiempo de acelerado dado, la superficie del bucle se puede suponer independiente de la escala de ampliación (obsérvese que el producto escala de ampliación por los correspondientes valores de la superficie, de la tabla II.13, da valores prácticamente iguales.
- a temperatura dada, la superficie del bucle disminuye al aumentar el tiempo de ensayo o acelerado. Fig. 2.18 y 2.19.
- la temperatura de los bucles disminuye al disminuir la temperatura o aumentar la viscosidad del fluido. La evolución pasa por un cero (fig. 2.19 y 2.19 bis), situado entre las viscosidades correspondientes a los 25 y 27 °C. La superficie es negativa para temperaturas menores, inferiores a las del medio ambiente, que se alcanzaron con la ayuda de un criostatado.

De la observación de los reogramas obtenidos se deduce que :

ESTUDIO REOVISCOSIMETRO CONO-PLATO FERRANTI

SUPERFICIES DE LOS BUCLES DE HISTERESIS

FLUIDO SAE 20 AX NEWTONIANO
 CONO MEDIO
 1.000 R.P.M.

SUPERFICIE EN CM²
 $1 \text{ CM}^2 = 38.640,8 \frac{\text{dinas.cm}}{\text{s}} \frac{1}{\text{cm}} = 9.196,5104 \times 10^{-10} \frac{\text{Kcal}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \times \text{escala}$

		TEMPERATURA-VISC.																										
		48,5 °C 3,65 P.				40,5 °C 5,5 P.				32,5 °C 8,4 P.				28,5 °C 10,5 P.				24,5 °C 13,2 P.				20,5 °C 16 P.						
ESCALA EMPL.	ACELERACIONES s ⁻¹				s ⁻¹				s ⁻¹				s ⁻¹				s ⁻¹				s ⁻¹							
	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60
x5	5,5	3,2	1,5	-	5,6	2,1	-	-	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-3,5	-	-	-
x4	7,7	3,7	2,0	1,0	7,5	2,7	1,4	-	2,7	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	0,54	-4,3	-	-	-	-	-	-	-
x3	10,7	5,3	2,6	1,9	11,-	3,6	1,9	1,2	4,1	1,1	0,7	0,4	1	1,0	0,6	0,5	0	-0,2	-0,9	-0,77	-5,6	-0,5	-0,8	-1,7	-	-	-	-
x2	17,3	7,9	4,7	3,0	17,-	6,8	3,0	2,3	6,0	3,6	2,5	2,4	2,2	1,7	2	1,3	-0,75	-1,-	-2,2	-2,5	-7,9	-3,6	-4,5	-2,5	0	-	-	-
x1	38,6	18,3	9,5	5,9	31,-	14,0	8,2	4,7	13,4	7,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TABLA II.13

ESCALA	ACELERACIONES s ⁻¹				s ⁻¹				s ⁻¹				s ⁻¹				s ⁻¹				s ⁻¹							
	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60	10	20	40	60
x5	25,-	14,7	6,9	-	25,5	9,5	-	-	6,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-16	-	-	-	-	-	-	-
x4	28,-	14,6	7,3	3,68	26,-	10,-	5,1	-	10,-	-	-	-	3,68	-	-	-	-	-	-	-2	-15,8	-	-	-	-	-	-	-
x3	29,5	14,6	7,2	5,2	30,-	10,1	5,2	3,3	11,3	3,-	1,9	1,1	2,76	2,76	1,66	1,38	0	-2,5	-2,5	-2,1	-15,6	-1,38	-2,2	-2,7	-	-	-	-
x2	32,-	14,6	8,6	5,5	31,-	12,2	5,-	4,2	11,-	6,6	1,4	1,4	4,-	3,1	3,6	2,4	-1,38	-1,84	-4,-	-4,6	-14,5	-6,6	-8,2	-4,6	-	-	-	-
x1	35,5	16,9	8,8	5,5	28,5	12,9	7,5	4,3	12,2	6,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		48,5 °C 3,65 P				40,5 °C 5,5 P				32,5 °C 8,4 P				28,5 °C 10,5 P				24,5 °C 13,2 P				20,5 °C 16 P						

ESTUDIO REOVISCOSIMETRO CONO-PLATO FERRANTI

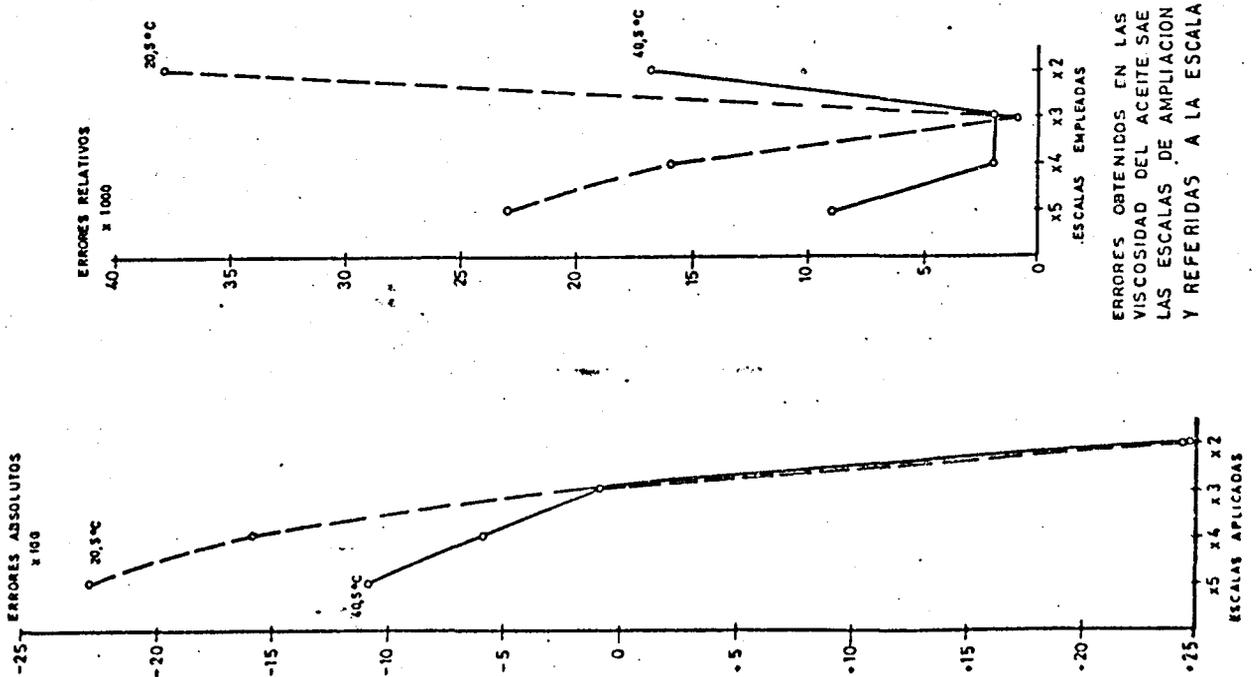
SUPERFICIES DE LOS BUCLES DE HISTERESIS

FLUIDO SAE 20 AX NEWTONIANO CONO MEDIO 1.000 R.P.M.

SUPERFICIES EN $\frac{\text{Kcal}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \cdot 10^6$

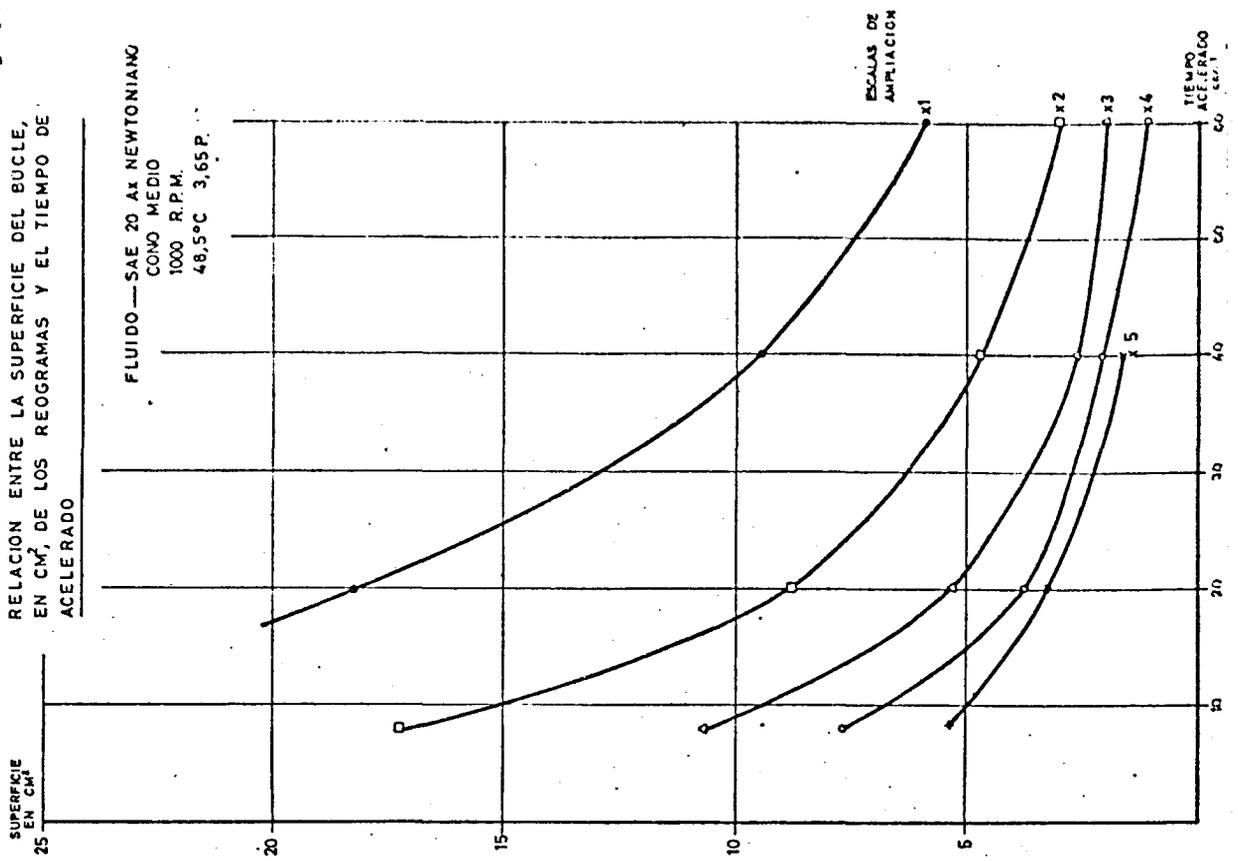
TABLA II.14

Fig. 2.16



ERRORES OBTENIDOS EN LAS MEDIDAS DE VISCOSIDAD DEL ACEITE SAE 30 AX SEGUN LAS ESCALAS DE AMPLIACION EMPLEADAS Y REFERIDAS A LA ESCALA x1

Fig. 2.18



RELACION ENTRE LA SUPERFICIE DEL BUCLE, EN CM², DE LOS REOGRAMAS Y EL TIEMPO DE ACELERADO

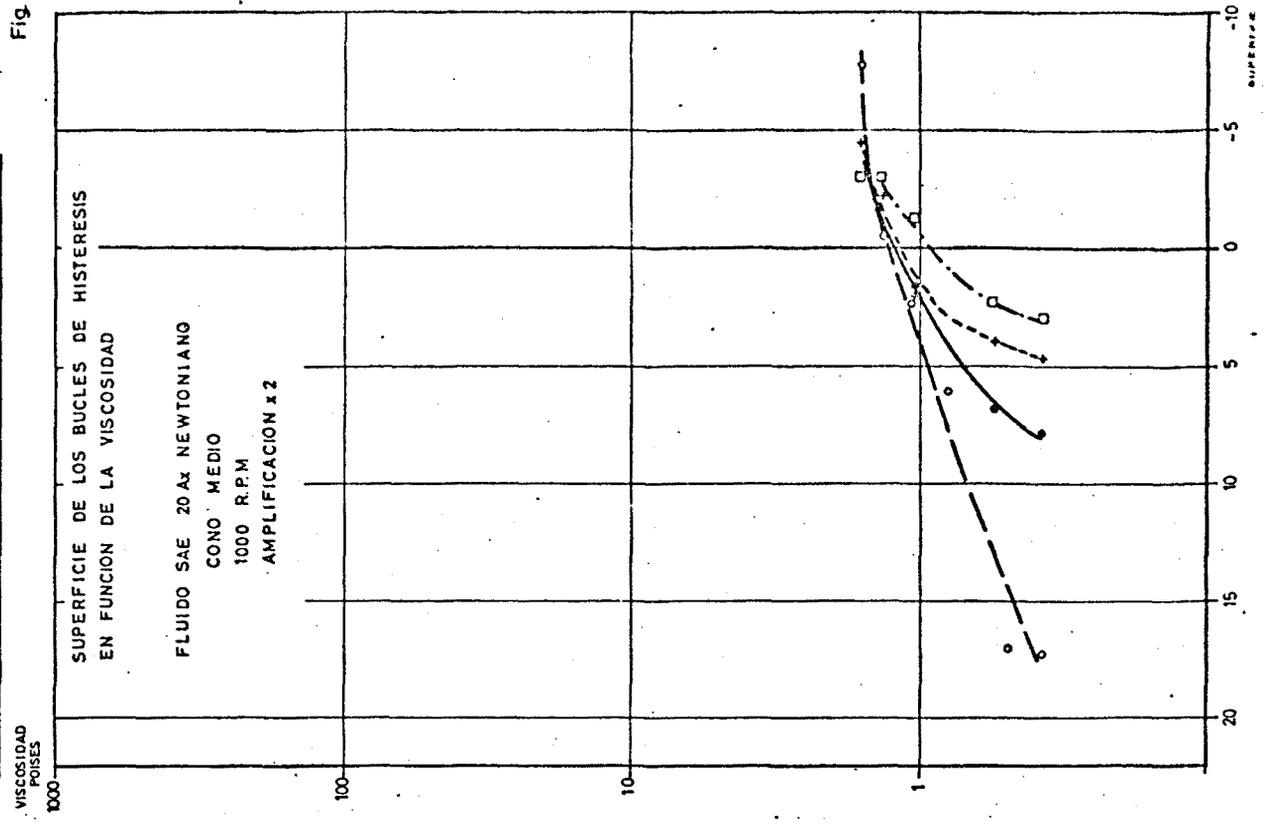
FLUIDO — SAE 20 AX NEWTONIANO
COMO MEDIO
1000 R.P.M.
48.5°C 3.65P.

ESCALAS DE AMPLIACION

TIEMPO ACELERADO (seg.)

ESTUDIO REOVISCOSIMETRO CONO PLATO FERRANTI

Fig 2.19bis

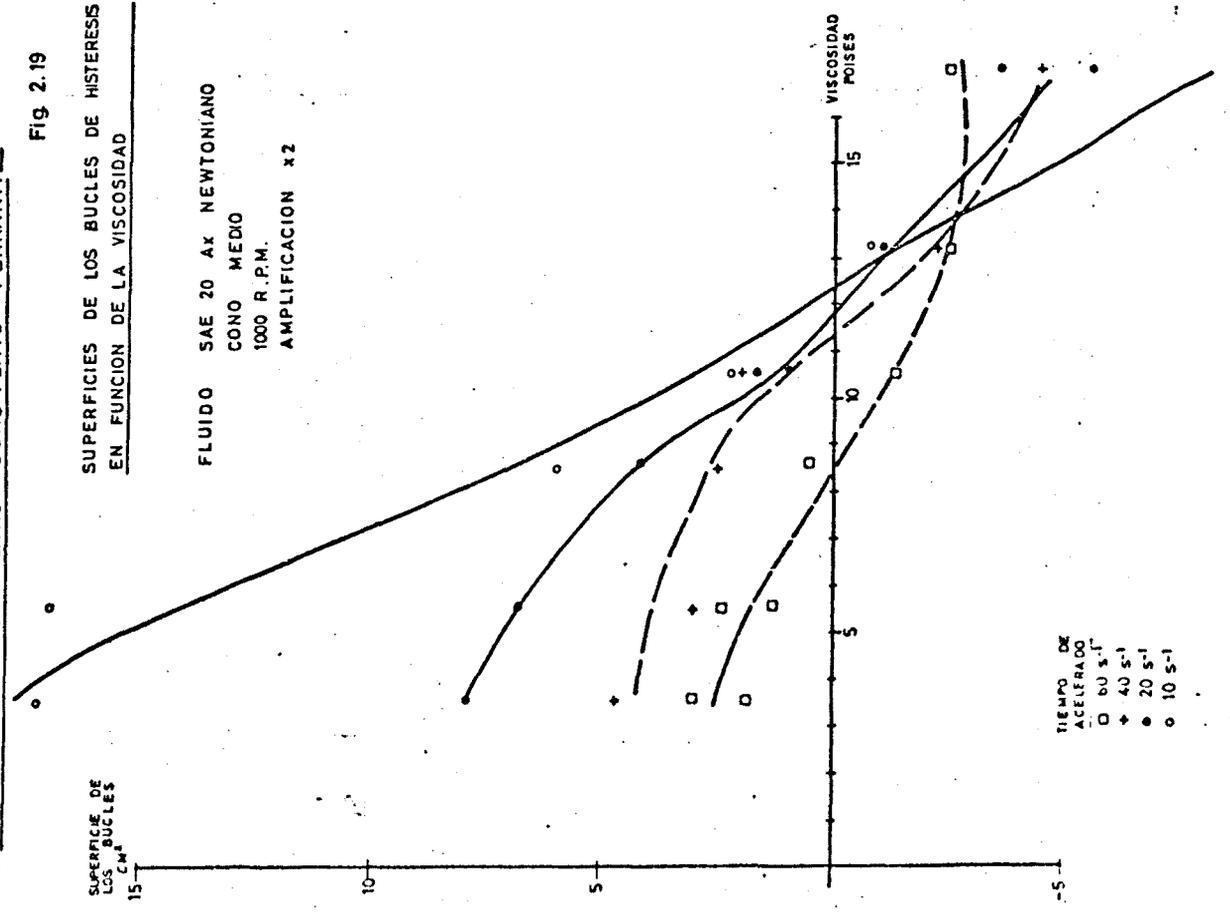


ESTUDIO REOVISCOSIMETRO CONO PLATO FERRANTI

Fig 2.19

SUPERFICIES DE LOS BUCLES DE HISTERESIS EN FUNCION DE LA VISCOSIDAD

FLUIDO SAE 20 AX NEWTONIANO CONO MEDIO 1000 R.P.M. AMPLIFICACION x 2



- el bucle tiende a ensancharse en la zona de bajos gradientes de velocidad, cuando el tiempo de ensayo es pequeño (gran aceleración).
- el bucle tiende a ensancharse en la zona de altos gradientes de velocidad cuando el tiempo de ensayo es grande (pequeña aceleración).
- a pequeños tiempos de ensayo, el camino de bajada queda por debajo del de subida (en ordenadas gradientes de velocidad), formándose un "ocho" al aumentar el tiempo de ensayo y sin que se haya alcanzado el cambio de posición total (disminuye la superficie del bucle, tendiendo a confundirse ambos recorridos).

Las superficies de los bucles se han expresado en cm^2 , que son equivalentes a $\text{Kcal}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$, pues la superficie de ordenadas, s^{-1} , por abcisas, dinas/cm^2 , para el cono medio es :

$$x) \text{ es } \varphi = 131,73 \times 1 \times \text{Escala empleada} \left[\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$y) \text{ es } D = 17,6 \times \text{R.P.M.} \quad (\text{s}^{-1})$$

y para los valores máximos :

$$I = 100\% \text{ con } x_{\text{max}} = 30 \text{ cm, luego } \varphi_{\text{max}} = 131,73 \times 100 \times \text{Escala}$$

$$\text{R.P.M.} = 1000 \text{ con } y_{\text{max}} = 20 \text{ cm, luego } D_{\text{max}} = 17,6 \times 1000$$

para la unidad de longitud del gráfico

$$\frac{\varphi}{x} = \frac{131,73 \times 100}{30} \times \text{Escala} = 439,1 \left(\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2/\text{s}} \right) \times \text{escalas}$$

$$\frac{D}{y} = \frac{17,6 \times 1000}{20} = 880 \left(\frac{\text{seg}^{-1}}{\text{cm}} \right)$$

La superficie del bucle en las condiciones aquí indicadas es :

$$x \cdot y \text{ (cm}^2\text{)} = x \cdot y \text{ (cm}^2\text{)} \times 439,1 \left(\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} \frac{1}{\text{cm}} \right) \times \text{Escala} \times \\ \times 880 \left(\frac{\text{seg}^{-1}}{\text{cm}} \right) = x \cdot y \cdot 38 \cdot 640,8 \left(\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2 \text{ s}} \right) \times \text{escala}$$

dimensionalmente :

$$\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2 \text{ s}} = \frac{F}{L^2 \cdot T} = \frac{F \cdot L}{T} \cdot \frac{1}{L^3} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Volumen}}$$

Teniendo en cuenta la equivalencia de :

$$1 \text{ dina} \cdot \text{cm} = 0,238 \cdot 10^{-10} \text{ Kcal.}$$

$$1 \text{ cm}^2 = 38.640,8 \left(\frac{\text{dinas} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3 \text{ s}} \right) \times \text{escala} = \\ = 9.196,514 \cdot 10^{-10} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{cm}^3 \text{ s}} \right) \times \text{escala}$$

Que nos justifica una interpretación energética del citado bucle o ciclo de histéresis, siendo la energía acumulada o sacada de la unidad de volumen del fluido en la unidad de tiempo.

En la tabla II.14 y en las figuras 2.20 y 2.21 se presentan los valores de las superficies en Kcal/cm³.s, en función de tiempos de acelerado y de las viscosidades del fluido, conservándose todas las conclusiones antedichas para los resultados expresados en cm².

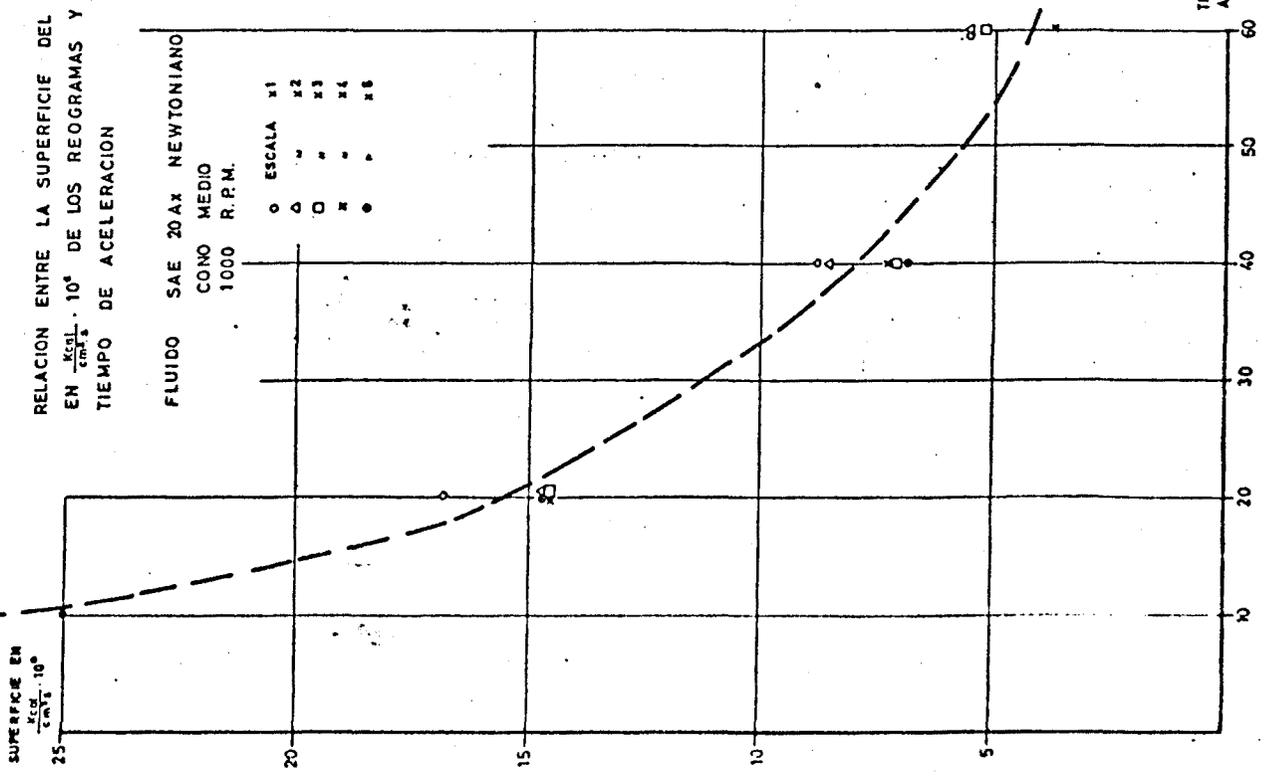
— ESTUDIO REOVISCOSIMETRO COMO PLATO FERRANTI —

Fig. 2.20

RELACION ENTRE LA SUPERFICIE DEL BUCLE EN $\frac{\text{Kcal}}{\text{cm}^2 \cdot 10^6}$ DE LOS REOGRAMAS Y EL TIEMPO DE ACELERACION

FLUIDO SAE 20 AX NEWTONIANO
 COMO MEDIO
 1000 R.P.M.

ESCALA x1
 x2
 x3
 x4
 x6



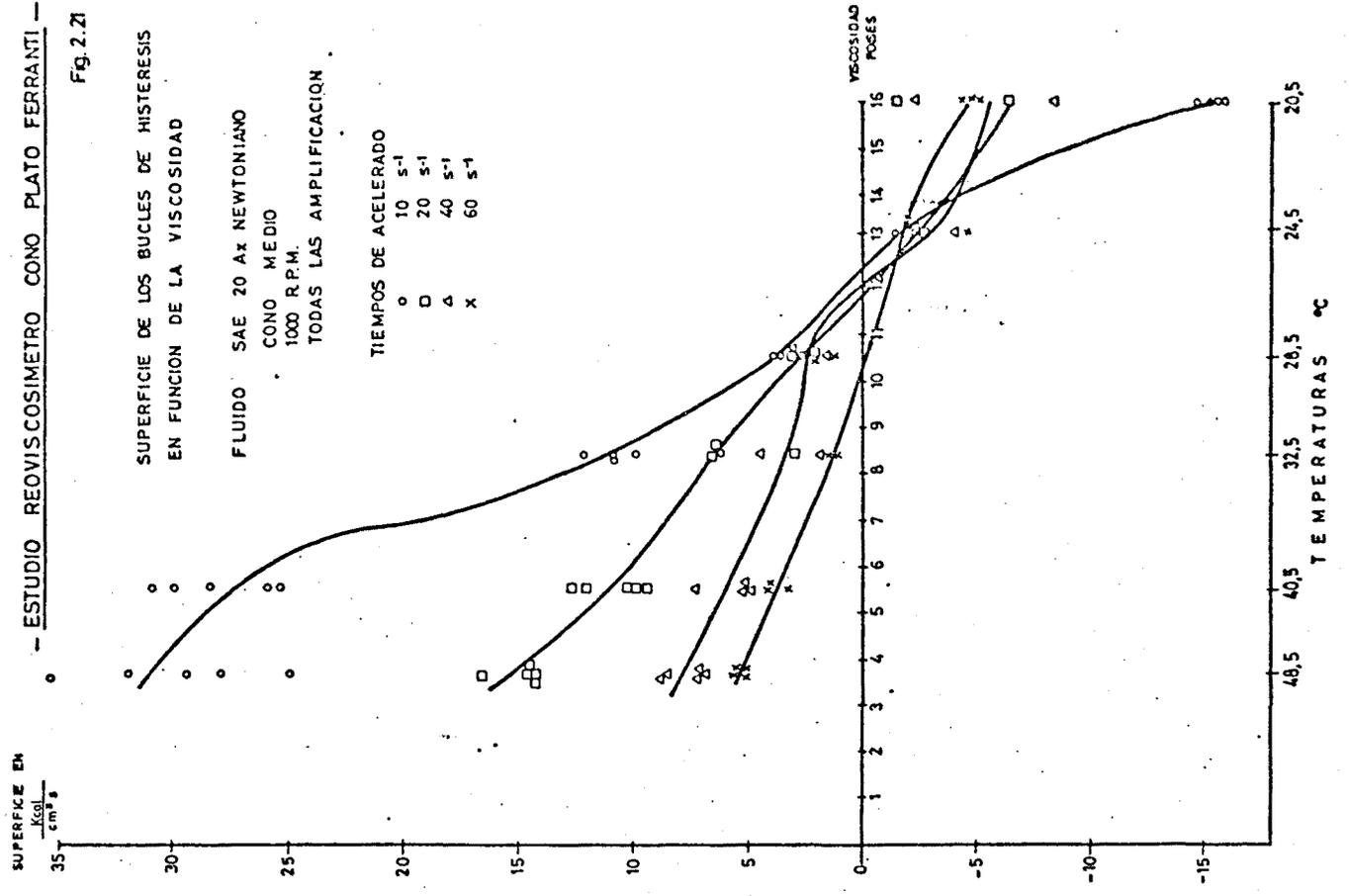
— ESTUDIO REOVISCOSIMETRO COMO PLATO FERRANTI —

Fig. 2.21

SUPERFICIE DE LOS BUCLES DE HISTERESIS EN FUNCION DE LA VISCOSIDAD

FLUIDO SAE 20 AX NEWTONIANO
 COMO MEDIO
 1000 R.P.M.
 TODAS LAS AMPLIFICACIONES

TIEMPOS DE ACELERADO
 o 10 s⁻¹
 □ 20 s⁻¹
 △ 40 s⁻¹
 x 60 s⁻¹



Los valores obtenidos quedan por debajo de los deducidos aplicando la expresión de M.KENELL, para el calor generado por segundo en la unidad de volumen de fluido al ser cizallado. Expresión que da para el caso de SAE 20 AX a 40,5 °C 1.000 r.p.m., x2, como medio y tiempo de 10 segundos, el valor de $9 \cdot 10^{-2}$ Kcal/cm³s., habiéndose obtenido para el reograma una superficie de $31 \cdot 10^{-6}$ Kcal/cm³s.

Las evoluciones seguidas por el valor de las superficies de los bucles en función del tiempo de acelerado se justifican teniendo en cuenta que la energía comunicada al fluido es siempre constante; lo que varía es el tiempo en el cual se le da, tiempo de acelerado o del ensayo, por lo que la superficie encontrada es mayor en el caso de tiempos pequeños, ya que el sistema tiene una respuesta a la termostatación prácticamente constante e independiente del tiempo de ensayo, y se produce acumulación de energía en el fluido, aumentando así su temperatura y evacuándola posteriormente en el plato.

Para valores de la temperatura de termostatación próximos a 25 °C, los de la superficie del bucle se anulan, siendo negativos a temperaturas menores. Estas temperaturas son próximas a la del medio ambiente y consecuentemente el gradiente térmico entre plato y fluido es bajo y hasta negativo; por lo tanto, la transmisión de calor es lenta, por lo que es de esperar que el incremento de velocidad del fluido y la generación interna de calor al cizallarlo le permita alcanzar la temperatura deseada, y no sobrepasarla, como sucede a las temperaturas más elevadas (nótese la aproximación de la curva x1 a la de HOPPLER en la figura 2.14 al ir disminuyendo la temperatura del ensayo).

Concluimos advirtiendo sobre el peligro de interpretar el fenómeno de calentamiento de la muestra al cizallarla, como de posible tixotropía, presentándose aquel solo a gradientes de velocidad elevados, es decir, en los ensayos a 1.000 r.p.m., y no en los ensayos a 100 r.p.m., para el fluido estudiado. Para otros fluidos, es recomendable verificar esta posibilidad de tixotropía con otro ensayo. También son de resaltar las buenas condiciones de termostatao del aparato, ya que en 10 s. el calor evacuado es prácticamente el 100% del calor ganado al cizallarse el fluido.

La misma consideración sobre gradientes de temperaturas preexistentes entre muestra y plato, tiempo de ensayo y gradiente de velocidades creado nos justifica la evolución de la forma de los bucles (fig. 2.17) y el cambio progresivo de posición de las curvas de subida y bajada del reograma.

El fenómeno se complica con efectos iniciales, de pegado, ordenación molecular y no sólo se deba a transmisión y generación de calor. La interpretación energética no justifica el comportamiento en los casos de bucles con signo opuesto, como el que se aprecia en la fig. 2.25.

2.6.4. - EFECTOS DE LA DISTANCIA CONO PLATO

La distancia cono plato se modifica con la ayuda del micrómetro del plato (Anejo II-B), visualizán-

dose la proximidad y contacto del cono plato a través del voltímetro de la unidad indicadora. Una vez fijada esta distancia en su valor más conveniente, la unidad de control automático la mantiene con un error máximo de 0,0001 pulgadas.

El gradiente de velocidades creado en el fluido se ve modificado según el alejamiento entre el vértice del cono y el plato para velocidades de giro dadas. De ser esta distancia grande, las mismas hipótesis establecidas para el estudio hidrodinámico ya no son válidas, pues no se podría suponer el gradiente de velocidades uniforme.

Se ha estudiado esta incidencia realizando una serie de reogramas de soluciones acuosas en POLIOX y controlando en cada reograma con el micrómetro el alejamiento entre el vértice del cono y el plato.

La tabla II.15 muestra los valores obtenidos para esta distancia en la serie de ensayos realizados, la diferencia respecto del valor medio obtenido y el porcentaje de la distancia sobre 0,05 m/m., límite de trabajo que se da en los estudios teóricos. Con la distancia máxima obtenida se calcula el gradiente de velocidades para el radio del cono empleado :

$$R_{\max} = 35 \text{ m/m.}$$

$$D(r) = \frac{\Omega r}{1 + r \operatorname{tg} \psi} = \text{r.p.m.} \left(\frac{r}{60 \cdot d + r \cdot 0,0593} \right) (s^{-1})$$

$$\text{si } d = 0 ; D(r) = \text{rpm} \frac{1}{0,0593} \approx 16,8 \text{ r.p.m. } s^{-1} \text{ (valor teórico)}$$

ESTUDIO REOVISCOSIMETRICO MEDIANTE

DISTANCIAS CONO PLATO

INDICACION EN ENSAYO m/m.	INDICACION AL CONTACTO m/m.	DISTANCIA m/m.	DIFERENCIA VALOR MEDIO	% DE 0,05 m/m.
6,198	6,173	0,025	0,012	50
6,204	6,185	0,009	-0,005	18
6,198	6,179	0,009	-0,005	18
6,194	6,178	0,016	0,003	32
6,200	6,180	0,020	0,007	40
6,191	6,174	0,017	0,004	34
6,191	6,174	0,017	0,004	34
6,211	6,172	<u>0,039</u>	<u>0,026</u>	<u>78</u>
6,192	6,173	0,019	0,006	38
6,192	6,172	0,020	0,007	40
6,198	6,181	0,017	0,004	34
6,201	6,179	0,022	0,009	44
6,198	6,178	0,020	0,007	32

DISTANCIA MEDIA = 0,013 m/m.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-x_1)^2}{n}} \approx 0,0051$$

$\Lambda_{max.} = 0,026$ m/m.

$$\text{Si } d=0,039 ; D(r) = \text{rpm} \left(\frac{r}{2,34 + r \cdot 0,0598} \right) (\text{s}^{-1})$$

para $r = R_{\text{max}} = 35 \text{ m/m.}$; $D(R_{\text{max}}) = \text{r.p.m.} \cdot 7,8953 \text{ s}^{-1}$

valor alcanzado para la distancia como plato máxima observada en los ensayos.

Esta distancia máxima tiene una posibilidad muy baja de presentarse y, en todo caso, la simple inspección visual de una serie de medidas permitiría desecharla por demasiado errónea. De todos modos, los resultados muestran la gran influencia de esta distancia, el error que nos introduce y la magnitud que éste puede alcanzar. Se debe cuidar en todos los ensayos la máxima precisión y mínimo valor de este alejamiento y, en el peor de los casos, la constancia del alejamiento en todos los ensayos para que a un cierto nivel los resultados sean comparativos entre sí.

Una serie de ensayos sobre una misma muestra de la solución empleada y con distancias como plato aleatorias da reogramas que se sitúan dentro de unos límites fácilmente determinables (fig. 2.22) y que se puedan re-

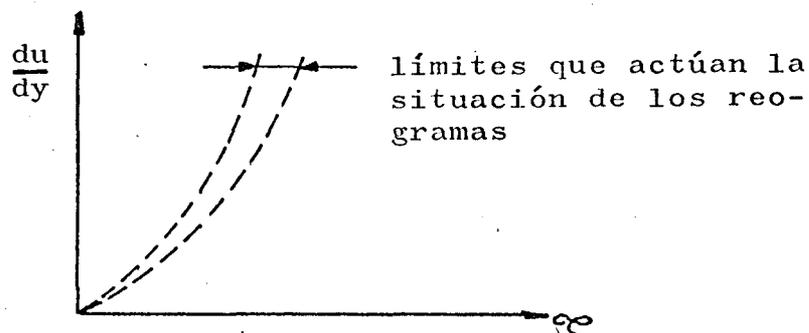


Figura 2.22.

ducir, disminución de la dispersión de los resultados, - con un cuidadoso y sistemático control de la distancia - cono-plato, fácilmente realizable con la ayuda del tornillo micrométrico y el voltímetro da la unidad indicadora.

2.6.5. - EFFECTOS DE INERCIA Y OTROS ; PICOS, CENTRIFUGADO

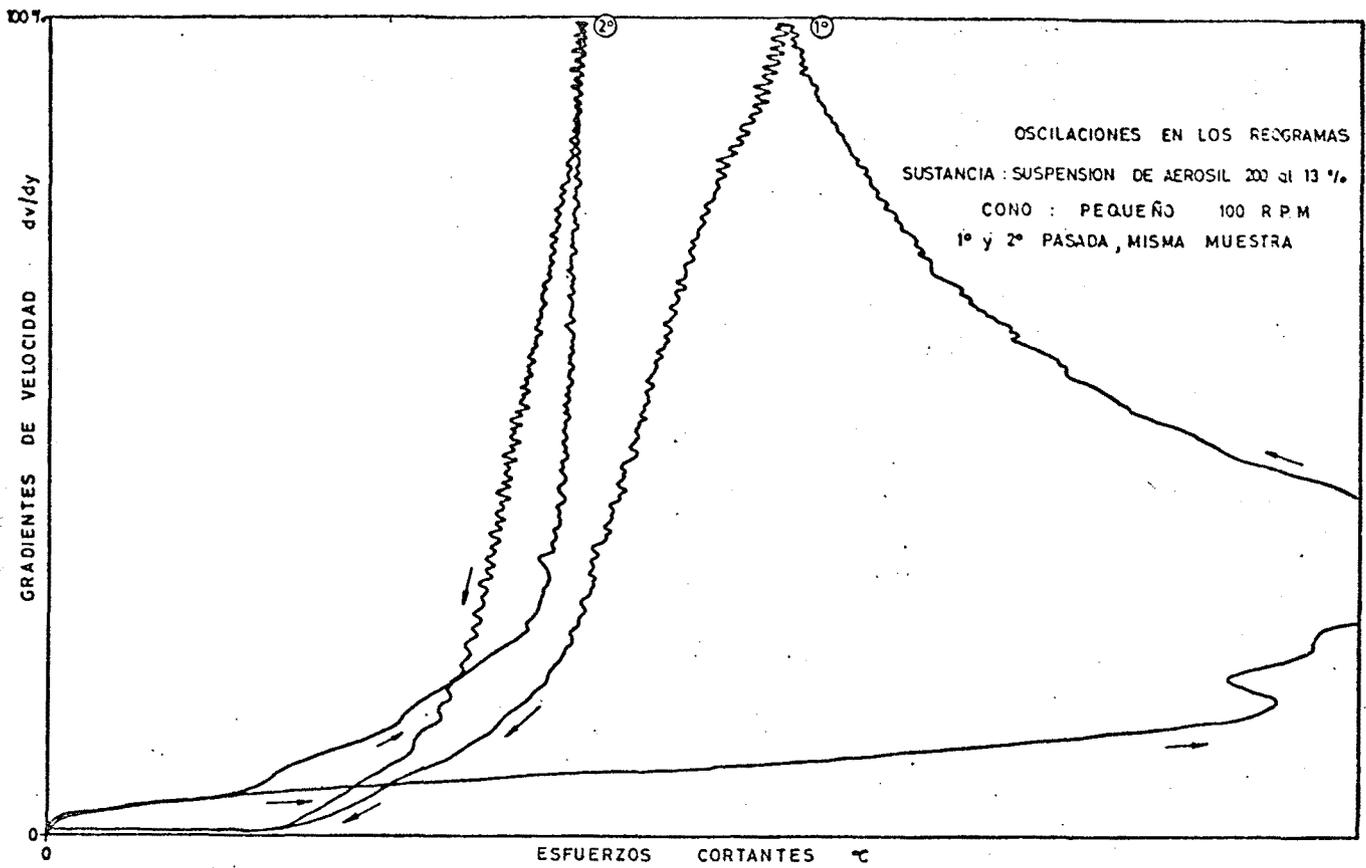
Según SLATTERY (1961), los efectos de inercia en el aparato son totalmente despreciables.

Diversos fenómenos extraños aparecen en los reogramas. Muchos de ellos, en principio, son justificables por las posibles inercias del aparato y anomalías - mecánicas. Un análisis más concienzudo de estas anomalías descubre que las causas pueden ser otras muy diversas.

Los reogramas, en general, presentan en ciertos puntos oscilaciones del valor del esfuerzo cortante. Estas oscilaciones son de un carácter más o menos brusco en función de la naturaleza física y condiciones del - fluido. En ellas se incluyen : tipo de fluido, temperatura, carácter general del fluido, características del - equipo de amplificación, de medida, de registro y de control, características del soporte mecánico y del grado - de trabajo de la muestra (fig. 2.23, 2.24, 2.25).

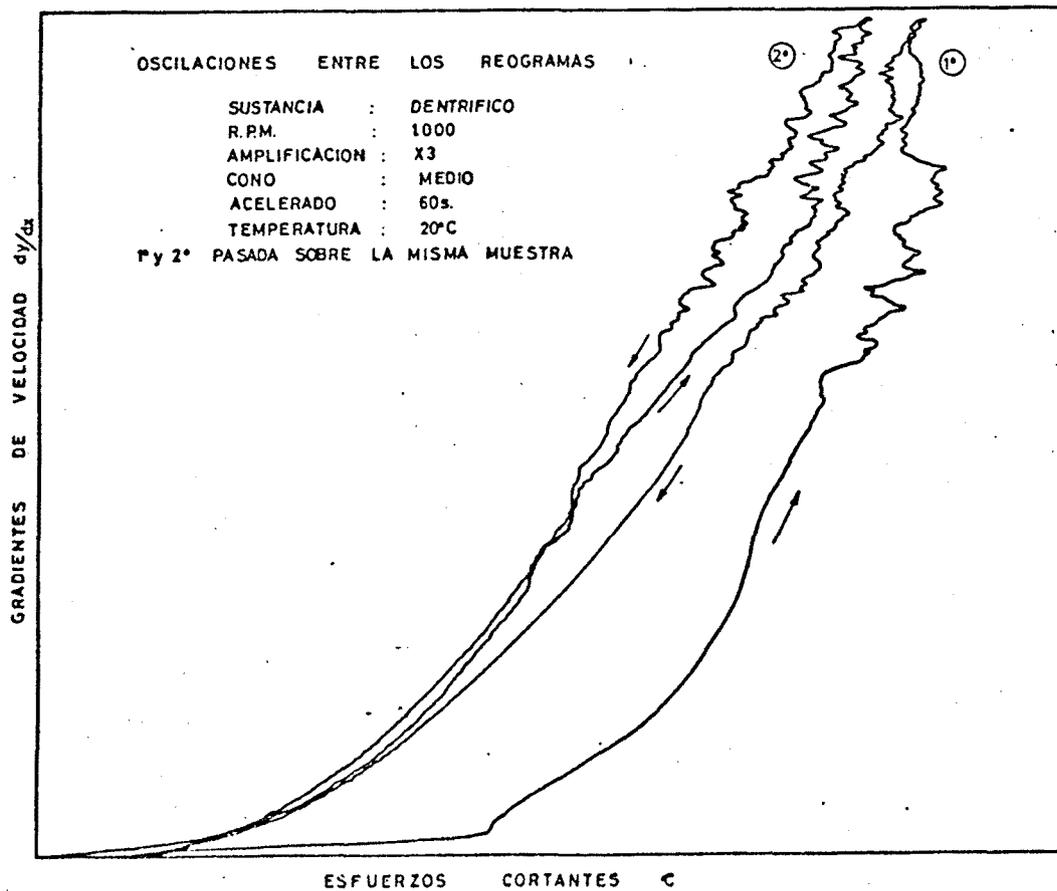
— REOVISCOSIMETRO CONO - PLATO FERRANTI —

Fig. 2.23



— REOVISCOSIMETRO CONO-PLATO FERRANTI—

Fig. 2.24



En este sentido, se ha realizado un estudio sistemático sobre soluciones de C.M.C., POLYOX, y SAE 20 AX. En todas ellas han aparecido perturbaciones de este tipo y que consideramos no son de gran interés. En los ensayos sobre una misma muestra de POLYOX, el primer reograma presenta oscilaciones del valor del esfuerzo cortante importantes, no apareciendo éstas en el segundo - con tanta intensidad, excepto en el extremo superior del reograma (fig. 2.26).

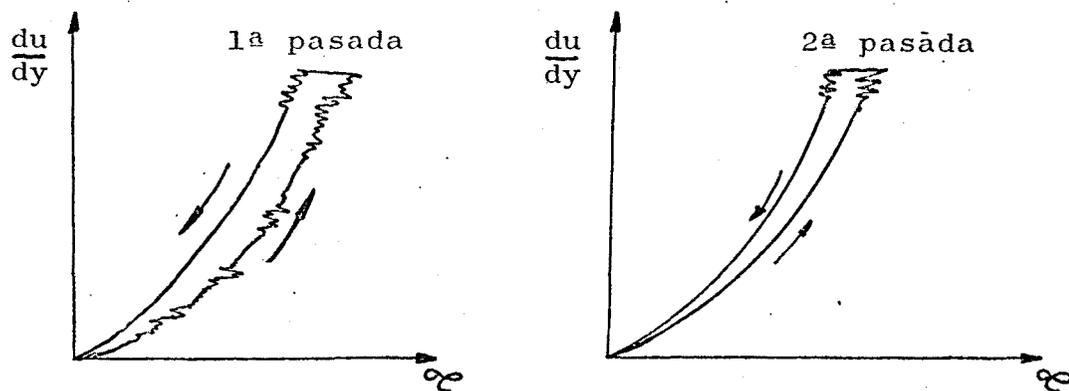
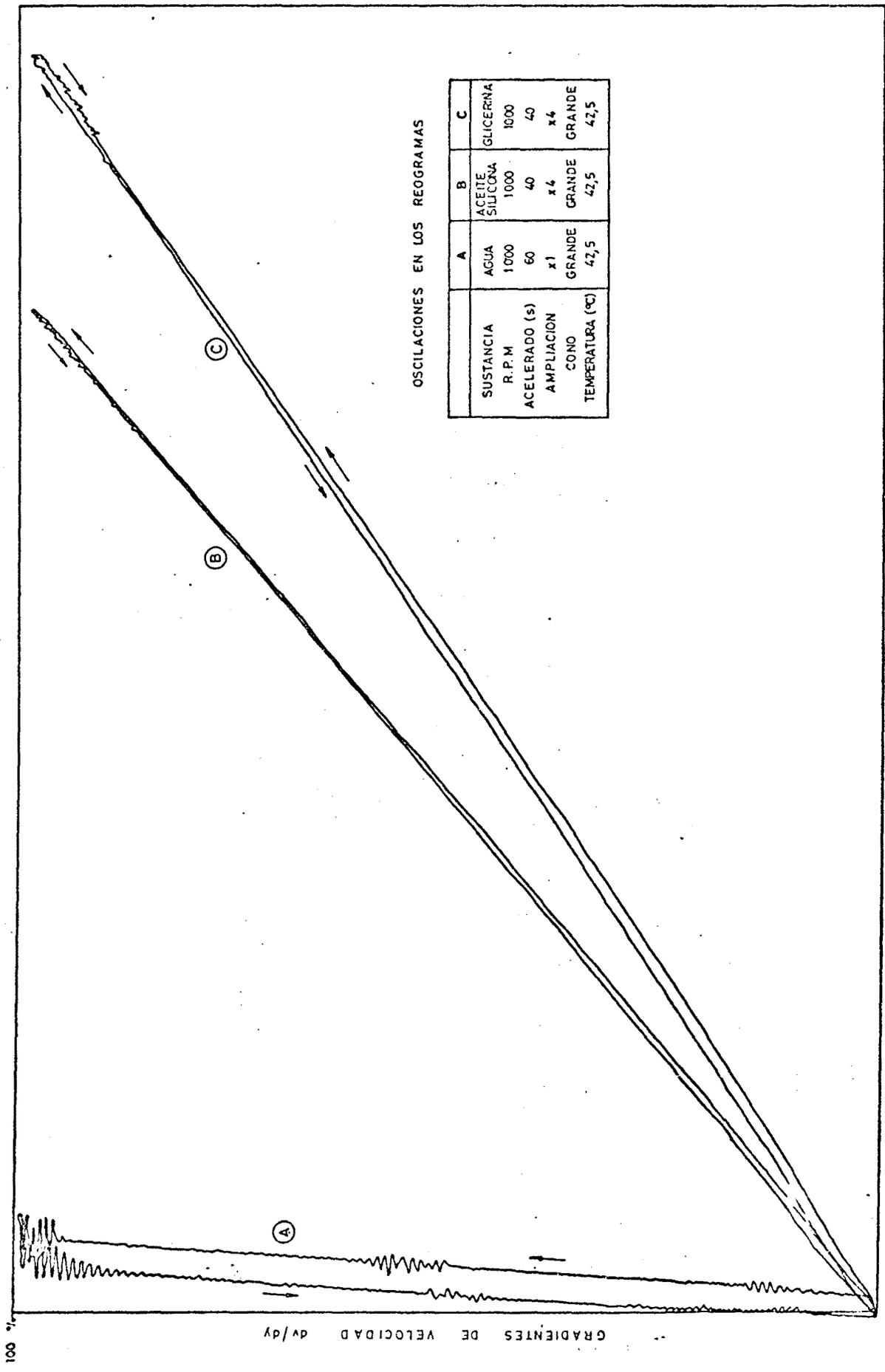


Figura 2.26.

Para ver si las inestabilidades del esfuerzo cortante en el primer cizallado de la muestra era un fenómeno estable que desaparecía en el primer ensayo y - que, después de cierto tiempo de reposo, finalizada la cizalladura, volvía a manifestarse, se han realizado ensayos esperando dos horas de un cizallado a otro (muestra POLYOX WRS 301 al 15%) sin que se haya vuelto a presentar este efecto. Tiempos de espera mayores no son recomendables, pues existe el peligro de un cambio de concentración apreciable por evaporación del agua solvente.

Fig. 2.25

REOVISCOSIMETRO CONO - PLATO FERRANTI



ESFUERZOS CORTANTES

Este fenómeno hace suponer que se produce - una posible modificación de la estructura del polímero. En este sentido, se hicieron otros ensayos de compresibilidad y de mezcla de diversas muestras, cizalladas y no cizalladas. Los ensayos de compresibilidad a 250 Kg/cm^2 en 10 ciclos, además de eliminar los gases, muestran que con ellos no se han variado la característica de comportamiento, apareciendo las oscilaciones de esfuerzo cortantes en un primer reograma sobre una muestra no cizallada. Luego, la componente de esfuerzo normal no tiene ninguna influencia sobre este comportamiento y solamente los esfuerzos de cizalladura lo modifican. Tengamos en cuenta el caracter viscoelástico del POLYOX WSR 301 disuelto en agua.

Se planteaba el problema de suponer el origen de este comportamiento en un ordenamiento y estirado de las macromoléculas disueltas. Si se mezclan muestras cizalladas con muestras cizalladas, no se presenta, sobre la mezcla, un cambio de comportamiento, por lo que se puede hablar de un fenómeno de ordenamiento molecular. Si se mezclan muestras cizalladas con no cizalladas, la resultante presenta una cierta modificación de comportamiento, oscilaciones de esfuerzos cortantes, función de la concentración de POLYOX no cizallado. Sucesivos reogramas a velocidades máximas crecientes sobre una misma muestra ponen en evidencia que las oscilaciones aparecen en el intervalo de extremos que corresponden a las velocidades máximas de dos ensayos consecutivos (fig. 2.27) sobre la misma muestra.

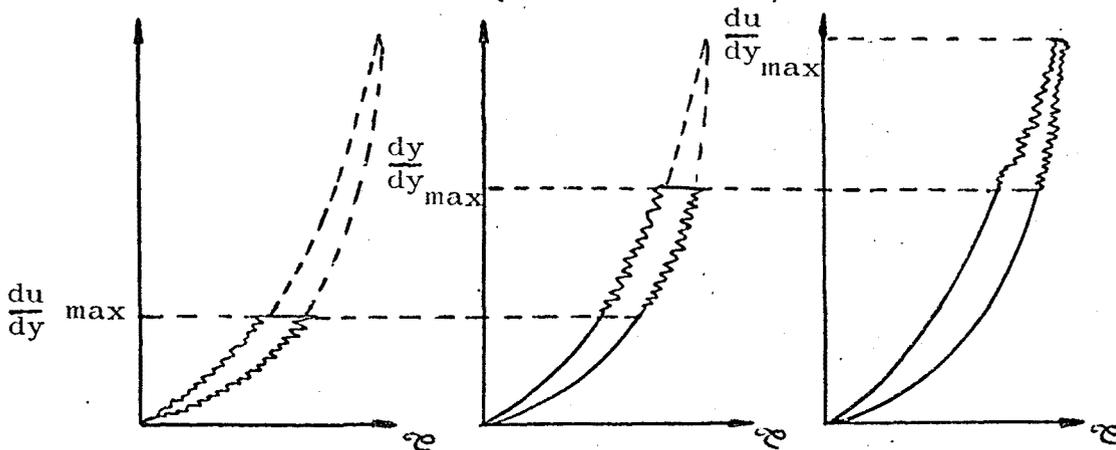


Figura 2.27.

El control del peso específico de las muestras, antes y después del cizallado, podría indicar que este fenómeno de oscilaciones de los valores del esfuerzo cortante se debe a una rotura de las macromoléculas. El pequeño volumen de las muestras cizalladas ($0,1 \text{ cm}^3$) y la falta de equipos densimétricos aptos para esta medida no han permitido este control, y el hecho de que el segundo reograma se monte sobre el mínimo de las oscilaciones nos hace prescindir de la hipótesis de rotura y no lo hace necesario.

Con la finalidad de conocer más este fenómeno de oscilaciones de los esfuerzos cortantes se ha estudiado la frecuencia de oscilación en el interior de ciertos valores del gradiente de velocidad. Las observaciones se resumen en las tablas II.16 y II.17, las únicas conclusiones que se extraen son :

- que el total de oscilaciones es cierta función de la temperatura (decrece al aumentar ésta).

- que en los puntos de inflexión de los reogramas, la amplitud de estas oscilaciones decrece con el aumento de la concentración (la aptitud disminuye con el espesamiento).

Ninguna de estas observaciones contradice la hipótesis de rotura y ordenamiento de la macromolécula - del polímero.

Otros fenómenos pueden producir estas oscilaciones del esfuerzo cortante, tales como la falta de limpieza en el cono plato, la introducción de gases disueltos que producen efectos neumáticos al ser cizallados, - el borde formado por la muestra de fluido en el cono plato (fig. 2.28).

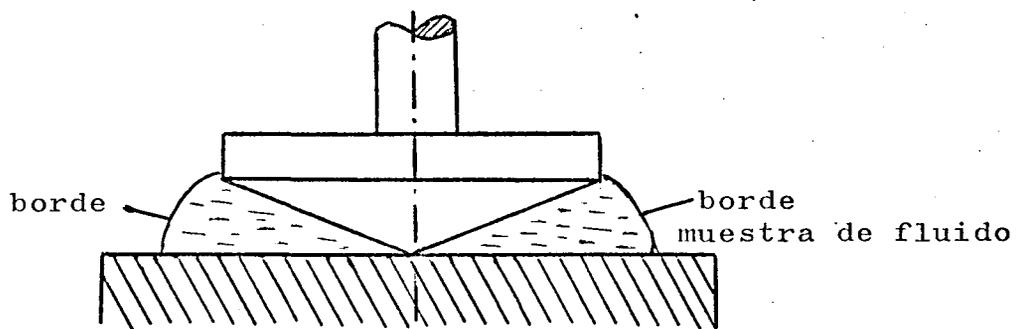


Figura 2.28.

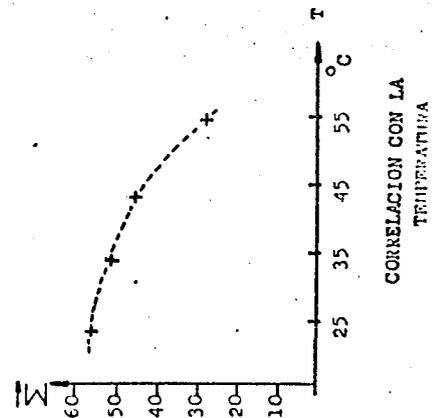
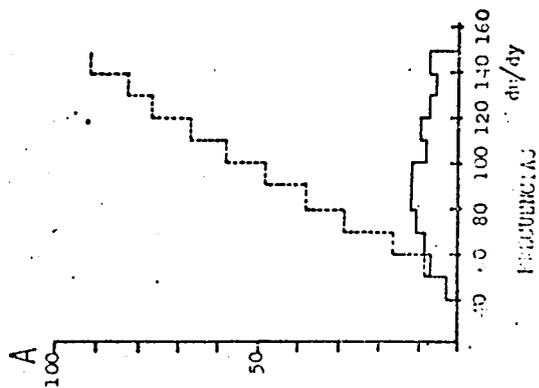
La fuerza de cohesión capilar es la que permite que el fluido queda atrapado entre el cono y el plato y no sea centrifugado durante la cizalladura. La formación del borde da una masa de fluido que es sometida a la máxima fuerza centrífuga y tiene un mínimo de cohesión con el cono plato. Este fenómeno hace que algunas oscilaciones del esfuerzo cortante se deban a desplazamientos

ESTUDIO DEL REOVISCOSIMETRO FERRANTI

Frecuencias y amplitudes de las oscilaciones de esfuerzos cortantes

du/dy (mm.) POLYOX WSR 301 5%

T, °C	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	Σ	%
25°C	5	5	4	3	8	5	3	7	7	4	5	5	56	17,-
%	8,9	8,9	7,1	5,4	14,3	8,9	5,4	12,1	12,5	7,1	8,9	8,9		
35°C	0	7	6	6	4	8	6	3	2	3	7	52		
%	0	13,5	11,5	11,5	7,7	15,4	11,5	5,8	3,8	5,8	13,5	15,8		
55°C	0	7	5	7	5	5	2	4	3	3	3	44		
%	0	15,9	11,4	15,9	11,4	11,4	4,5	9,1	6,8	6,8	6,8	13,3		
55°C	0	0	3	4	3	3	2	3	4	2	3	27		
%	0	0	11,1	14,8	11,1	11,1	7,4	11,1	14,8	7,4	11,1	8,2		
25°C	1	1	4	8	6	7	8	4	6	4	5	54		
%	1,8	1,8	7,4	14,7	11,1	13,-	14,7	7,5	11,1	7,4	9,3	16,4		
25°C	2	3	4	1	9	7	9	10	9	6	5	70		
%	2,8	4,3	5,7	8,6	12,8	10,-	12,8	14,2	12,8	8,6	7,2	21,2		
Σ	8	23	26	34	35	35	30	31	31	22	28	303		91,9
% A	2,4	7,-	8,-	10,3	10,6	10,6	9,1	9,4	9,4	6,7	8,5	92		100,-
	9,4	17,4	27,7	38,3	48,9	58,0	67,4	76,8	83,5	92,0				



Polyox WSR301 45°C
7.9.72 - 8.9.72

ca.	Y _M	Y _m	Δy
15	50	42	8
10	88	82	6
8	82	68	14
5	52	46	6

Polyox WSR301 55°C
7.9.72 - 8.9.72

ca.	Y _M	Y _m	Δy
15	-	-	-
10	102	93	9
8	82	75	7
5	57	49	8

Polyox WSR301 25°C
7.9.72 - 13.9.72

ca.	Y _M	Y _m	Δy
15	46	34	2
10	74	64	10
8	59	49	10
5	47	40	7

Polyox WSR301 25°C
7.9.72 - 8.9.72

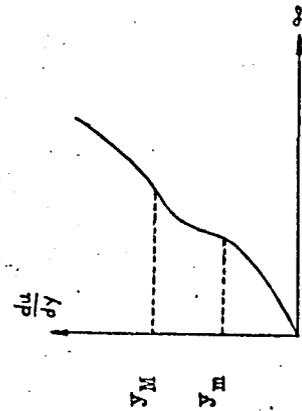
ca.	Y _M	Y _m	Δy
15	45	35	10
10	74	66	8
10	75	50	25
8	62	41	21
5	42	33	9
5	43	27	16

Polyox WSR301 35°C
7.9.72 - 8.9.72

ca.	Y _M	Y _m	Δy
15	52	48	4
10	85	75	10
8	73	55	18
5	50	38	12

Polyox WSR301 25°C
7.9.72 - 11.9.72

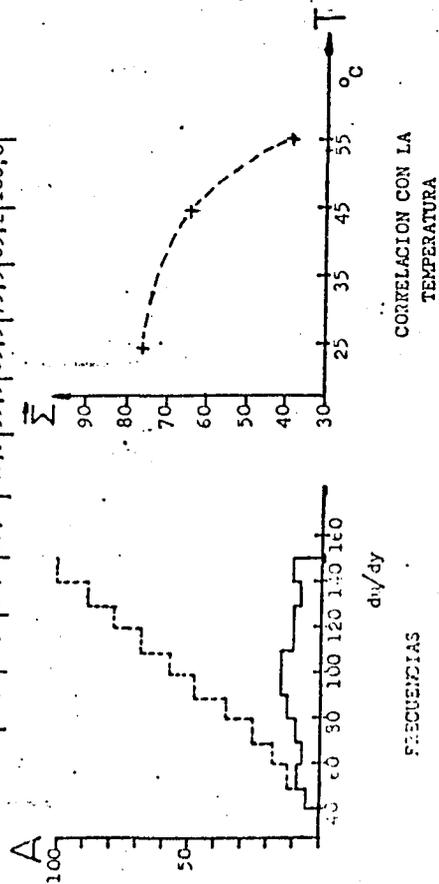
ca.	Y _M	Y _m	Δy
15	44	41	3
15	46	35	11
10	73	70	3
8	63	48	15
5	42	34	8



Frecuencias y amplitudes de las oscilaciones de esfuerzos cortantes.

du/dy (mm.) POLYOX COAGULANT 5%

T °C	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	Σ	%
25 °C	3	7	2	5	10	8	12	9	10	6	5	77	18,9
35 °C	4	7	5	9	8	9	12	8	9	7	7	85	20,8
45 °C	2	5	3	9	5	6	3	3	6	5	10	57	14,0
55 °C	1	2	1	4	6	2	2	4	2	3	7	33	8,1
25 °C	6	6	7	9	7	8	6	7	6	8	7	77	18,9
25 °C	4	4	4	6	8	9	10	10	8	9	7	79	19,3
Σ	20	30	25	39	42	46	45	41	41	38	43	408	100
Σ A	4,9	7,3	5,6	9,5	10,3	11,3	11,0	10,0	10,0	9,3	10,8	100	1,00
	12,2	17,8	27,3	37,6	48,9	59,9	69,9	79,9	89,2	100,0			



Nota: du/dy en mm resograma directo

Polyox Coagulant 45 °C
5.9.72 - 7.9.72

% c	Y _M	Y _m	y
15	47	44	3
10	35	20	15
8	48	21	27
5	42	30	12

Polyox Coagulant 25 °C
5.9.72 - 7.9.72

% c	Y _M	Y _m	y
15	39	21	18
15	40	21	19
10	34	23	11
8	51	28	23
5	35	19	16

Polyox Coagulant 25 °C
5.9.72 - 13.9.72

% c	Y _M	Y _m	y
15	33	20	13
10	30	19	11
8	39	22	17
8	38	25	13
5	36	23	13

Polyox Coagulant 55 °C
5.9.72 - 7.9.72

% c	Y _M	Y _m	y
15	33	48	5
10	38	27	11
8	-	-	-
8	53	30	23
5	49	41	8

Polyox Coagulant 35 °C
5.9.72 - 7.9.72

% c	Y _M	Y _m	y
15	49	45	4
15	48	38	10
10	35	21	14
8	42	24	18
5	40	30	10

Polyox Coagulant 25 °C
5.9.72 - 11.9.72

% c	Y _M	Y _m	y
15	39	30	9
15	-	-	-
10	65	62	3
8	58	40	18
5	37	20	17

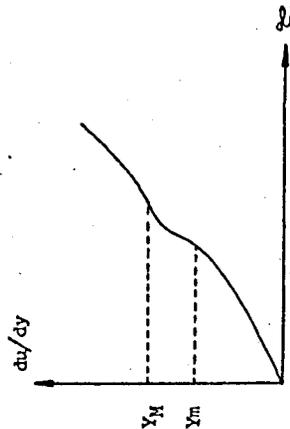


TABLA II.17

y, en algún caso, a desprendimiento del fluido que forma este borde.

En la figura 2.29 se esquematiza la incidencia de la presencia de este borde sobre el reograma.

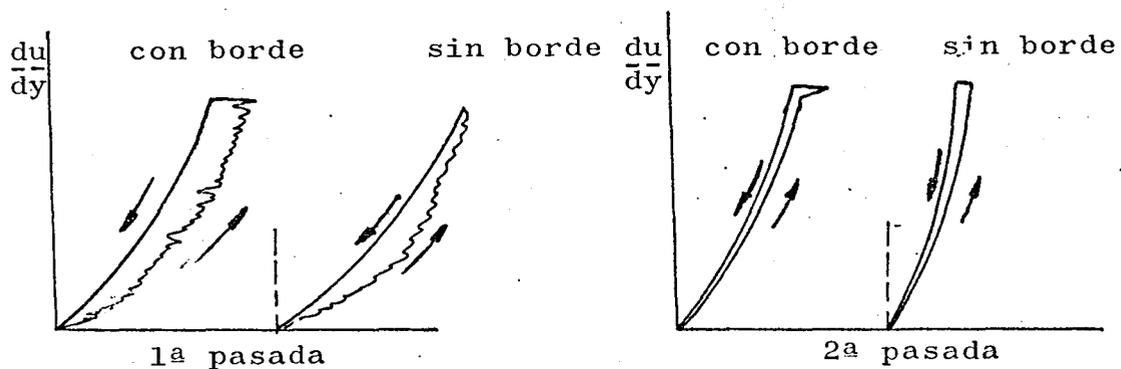


Figura 2.29.

En la primera pasada, el borde alimenta el interior de la muestra con macromoléculas no cizalladas. En la segunda, el borde pierde tensión superficial y se "afloja" del cono plato (se separa) a la velocidad máxima, produciendo oscilación del esfuerzo cortante en esa zona.

En conclusión, estas oscilaciones no tienen mayor importancia que la de manifestar unas perturbaciones debidas al carácter del fluido, al equipo mecánico, al equipo de amplificación y a la calidad de la muestra y su presencia no quita ninguna precisión al trabajo, ya que los reogramas son los mismos, sólo que uno presenta las oscilaciones montadas sobre él y los otros no.

2.6.6. - CONCLUSION

En el presente apartado se han desarrollado todos los estudios y observaciones realizadas sobre reo-viscosímetros como plato FERRANTI. Ello ha permitido presentar un estudio sistemático de los errores en las medidas según el origen de estos. También, conocer las características (performances) del aparato y sus posibilidades de utilización dentro de la Reología de fluidos. De todo esto se deduce la idoneidad del aparato para el trabajo emprendido de caracterización y estudio hidrodinámico de fluidos no newtonianos de carácter pseudoplástico.