



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.)

NOMENCLATURA

Capítulo II y Anejos del mismo.

τ_{ij}	Tensor esfuerzos cortantes.
e_{ij}	Tensor velocidad de deformación.
$D, \frac{du}{dy}, \frac{du}{dr}, \frac{dv}{dr}$	Gradientes de velocidad, según eje, según radio.
$n, v(r), v_{\max}$	Componente de la velocidad en la dirección x, a una distancia r del eje, máxima.
μ, μ_0, μ_∞	Viscosidad, límite a gradientes bajos, a elevados.
$p, \Delta p$	Presión, incremento entre dos secciones.
r, R, Re, r_i	Radio, valor determinado, exterior, interior.
$\tau, \tau_{\max}, \tau_p$ $\tau_e, \tau_i, \tau_{\theta\phi}$	Esfuerzo cortante, máximo, en la pared, en la pared del cilindro exterior, del interior, en un punto definido en coordenadas polares.
L, L_1, L_2, L_t	Longitud, valor dado, de trabajo.
Q	Caudal.
Ω, ω	Velocidad de giro o angular.
M	Momento o par.
$h, \Delta h$	Altura, incremento.
ϵ, ϵ_i	Característica de los reoviscosímetros de cilindros coaxiales.

ΔR	Diferencia entre R_e y R_i .
NRe, NRe_{cr}	Número de REYNOLDS, valor crítico.
ρ	Densidad.
C	Constante.
l	Distancia entre fondos de copa y cilindro (cilindros coaxiales).
ψ	Angulo formado por la generatriz del cono y el plato.
θ, ϕ	Coordenadas polares.
c	Distancia entre los puntos mas alejados del cono y del plato.
θ	Angulo formado por los ejes del cono y del plato.
d	Separación entre el vértice del cono y el plato.
E	Calor generado en el seno del fluido - por la cizalladura aplicada.
H	Calor generado por unidad de volumen.
ΔT	Incremento de temperatura.
k	Conductividad del cono plato.
α	Difusividad.
t	Tiempo de ensayo.
I	Lectura en la unidad indicadora.
x, y	Coordenadas cartesianas.
σ	Desviación típica.
n	Número de experiencias.
A_{max}	Amplitud máxima.

BIBLIOGRAFIA - CAPITULO II

1. - GARDNER/SWARD - Paint Testing Manual.
2. - PATTON - Paint Flow and Pigment Dispersion.
3. - Cataloge Section C - Rheology - Gardner.
4. - VAN WAZER-LYONS - Viscosity and Flow Measurement.
5. - KENNELL - The Measurement and Control of Viscosity and Related Flow Properties.
6. - WALTER - Basic Concepts and Formulae for the - Rheogoniometer.
7. - La Trempe - N^o 53.
8. - HEDIGER - Mesure des Caracteristiques Rhéologiques.
9. - Problemas Reológicos Prácticos - Gebrader Heake.
10. - La viscosité - Contrares S.A.
11. - Laboratoire de Mécanique des Fluides-Grenoble.
12. - EIRICH - Rheology, tomos I, II, III, IV.
13. - WILKINSON - Non-Newtonian Fluids.
14. - SHERMAN - Industrial Rheology.

15. - Curso de Reología - U.P.B.
16. - I Coloquio sobre problemática industrial e investigadora en el campo de la Reología - U.P.B.
18. - FITO-ESCARDINO - Determinación de las propiedades reológicas de los alimentos líquidos.
19. - BELLET-SANGELIN - Quelques experiences sur le comportement no newtonien des liquides organiques.
20. - THIRRIOT - Un point de vue de l'Hydraulicien sur la Rhéologie et la Thermodynamique des liquides organiques.
21. - WALTERS - Proceednigs of the Second International Congres on Rheology. A theory for the balance rheometre.
22. - YAMAMOTO - Theoretical Analysis of New Rheometers.
- 22 bis. WALTERS - Rheametrical flow systems.
23. - Melt Viscosity - Instron - A.Mendelson.
24. - High Shear Capillary Rheometer - Instron - Tahler y Murfitt.
25. - Rheological Propertses of S.B.R. Polymens by Capillary.
26. - Extrusión - Instron - Einhorn y Turetzky.

27. - Capillary Rheometry - Ballunan y Brown.
28. - Visco News - Nº 5,7,8 Contranes.
29. - Catálogo Instrun Maquinaria y Equipos.
30. - Fischer l Porter Catálogo.
31. - Catálogo Koehler Instrument Company Inc.
32. - Catálogo Fann Instrument Corperation.
33. - Venema High-Shear Viscosimeter.
34. - Catálogo Gaertuer Sciéntific Corporation.
35. - Catálogo Haake.
36. - Catálogo Bendix Process Instruments Division.
37. - Catálogo Saugamo Weston Controls.
39. - Viscosímetro rotatorio Emilia.
40. - Catálogo Rheometers Contranes AG.
41. - Brookfield Synchro - Lectric Viscometer.
42. - Ferranti Viscosimette Portatils.
43. - Catálogo Ferranti.

44. - Catálogos Veb Kambrinat Medizin Labartechmik.
45. - Catálogo Tensting Machines Inc.
46. - Catálogo Ruska Instrument Corperation.
47. - Calibration of the Ruska Rolling-Boll Viscosimeter - Langton y Virgil Orr.
48. - Apuntes Curso de Reología. I.Q.S. - Pascual.
49. - Mise en Aquation des résultats d'experiences.
50. - SOLER - Estudio comparatico de viscosimetría.
51. - ROCHAS - Ecoulement des fluides non newtoniens.
52. - NEDONCHELLE - Estudio del almidón y sus derivados.
53. - SOLER - Estudio de los volúmenes de Polyox inter
no.
54. - Instrument Engiveers Handbrok - Volume 7.
55. - FITO - La tecnología de los fluidos no-newtonia-
nos dentro de la ingeniería de los alimentos.
I Coloquio sobre la problemática industrial e in
vestigadora del campo en la Reología. U.P.B.
56. - PAWLONSK - Killloid Z 130-139 (1953)

NOTA.- La nota bibliográfica se refiere a la colección bibliográfica RHEOLOGY dirigida por EIRICH. Dada la extensión de esta obra y su gran contenido en artículos sobre flujo e instrumentación se cita -

sólo como referencia, explicitándose a continuación los artículos de mayor interés para este capítulo contenidos en ella e indicándose el tema concreto que tratan.

DETALLE BIBLIOGRAFICO MAS SIGNIFICATIVO DE RHEOLOGY DE EIRICH.

VOLUMEN I

<u>pág.</u>	<u>Título</u>	<u>Autor</u>	<u>Tema</u>
33	Phenomenological macro-rheology.	M.REINER	Flujo telescópico y rotacional.
251	Rheological properties under high pressures.	R.B.DOW	Capilar, rotacional, disco, alta posición.
435	Viscosity relations of high polymers.	T.G.FOX	Capilar.
653	Non-newtonian flow of liquids and solids.	J.G.OLDROYD	Capilar, rotacionales, conos.

VOLUMEN II

181	The Rheology of elastomers.	M.MOONEY	Rotacionales, extrusión.
475	Fundamental Techniques Fluids.	B.A.TOUNS	Capilar, coaxial oscilaciones.
503	Goniometry of flow and rupture.	A.JOBLING J.E.ROBERES	Goniómetro.

VOLUMEN III

- | | | | |
|-----|--|-------------|---|
| 18 | The principles of -
rheometry. | S.OKA | Capilar, rotacio
nales, disco co-
no, esfera, cai-
da bola, oscila-
ciones. |
| 121 | The Rheology of la-
tex. | R.N.WELTMAN | capilar, rotacio
nal vibraciones. |
| 443 | Rheology of lubrica <u>ti</u>
on and lubricants | A.BONDI | Capilar. |

VOLUMEN IV

- | | | | |
|-----|--|---------------|----------|
| 86 | The microrheology -
of dispersions. | H.L.GOLDSMITH | Capilar. |
| 251 | High-Shear viscome-
try. | A.RAUS | Capilar. |

RELACION DE FABRICANTES DE EQUIPOS DE REOMETRIA Y VIS-
COSIMETRIA

Sangamo Weston Controls Limited.

North. Barsted-Bognor Regis - Lusses - P⁰22 9BS -
ENGLAND

Ruska Instrument Corporation.

Houston, Texas 77036 - USA

Gardner Instruments

Gardner Laboratory Inc.

P.O. Box 5728 - 5521 Landy Lane
Bethesda - Maryland 20014 - USA

JENA ER Glaswork Schott - Gen., MAINZ

Hattenbergstr, 10

MAINZ - ALEMANIA OCCIDENTAL

INSTRON Limited

Halifax Road

High Wycombe, Bucks - ENGLAND

BURRELL Corporation

Scientific Instruments and Laboratory Supplies

318 Ewigs Mill Road

Coraopolis - Pensylvania 15108 - USA

KOEHLER Instrument Company, Inc.

1595 Sycamore Avenue

Bohemia L.I. - New York 11716 - USA

FANN Instrument Corporation
8625 Meadowcroft Street
Honston, Texas 77042 P.O. BOX 36423 - USA

A. VENEMA Apparayrnfabriek
Smirnoffstroat, 3, - Groninger - HOLLAND

Gaertner Scientific Corporation
1201 Wrightwood Avenue
Chicago 14, Illinois - USA

GEBRUDER HAAKE
75 Karlsruhe - Durlach
Dieselstr, 4 - ALEMANIA W. - GERMANY

VEB MLW - PRUFGERATE - WERK MEDINGEN
Sitz Freital
DDR - 821 Freital, Le kestr. 10 - ALEMANIA

CONTRAVES AG
Schaffhauserstrasse 580
CH - 8052 ZURICH - SUIZA

BROOKFIELD ENGINEERING LABORATOIRES
Stoughton, Nassachessets - USA

FERRANTI
Hollinwood, Lancashire - ENGLAND

A. KRUSS
Gertigstrasse 31 - HAMBURG

FISCHER PORTER Co.

Warminster Pasadena 18974 - USA

BENDIX Process Instruments Division

Praver 477

Ronceverte - W. Va 24970 - USA

TESTING MACHINAS INC.

Anityville - NEW YORK - USA

R.P. CARGILLE LABORATORIES INC.

Cedar Grover

N.J. 07009 - USA

COLORA Mesttechnik GMBH

7073 Lorch box 5 - WEST GERMANY

Pressure Products Industrie

Hatharo

Pensylvania 19040 - USA

BRABENDER INSTRUMENT INC.

48 East Nesley St.

South Hackensack - N.Y. 07606 - USA

OTROS FABRICANTES

FISH - SHURMAN CORP.

66 Portman Road

Nen Rochelle - N.Y. 10802 - USA

HALLIKALNEN Instruments

750 National Court
Richmond, California 94804 - USA

NORCROSS Corporation

251 Newtonville Avenue
NEWTON, Massachussets 02158 - USA

ARTHUR H. THOMAS CO.

Vine Street at thirt Street
Philadelphia - PA 19105 - USA

THE GEVIN CORPORATION

209 West Sylvania Ave.
NEPTUNE CITY - N.I. 07753 - USA

POLORAD ELECTRON CORP.

Long Island City N.Y. - USA

MARTINSON MACHINE CORP.

Kalamazoo, Michigan - USA

CENTRAL SCIENTIFIC CO.

2600 South Cadner Avenue
Chicago, Ill. 60647 - USA

PRECISION SCIENTIFIC COMPANY

3739 West Cortland Street
Chicago, Ill. 60647 - USA

INSTRUMENT ENGINEERING CO.

3100 Longhorn Boulevard
Austin, Texas 78758 - USA

APEX SCIENTIFIC CO.

59 Donna Maria Street
Orinda, California 94563 - USA

F.F. SLOCOMB CORP.

1401 Poplar Street
Wilmington, Del. 19899 - USA

BARWORT INC.

683 Morris Turnpike
Springfield - N.Y. D7081 - USA

PRECISION GAGE AND TOOL CO.

28 Volkenan Street
Daytona, Ohio 45410 - USA

LOUIS C. EITZEN CO. INC.

P.O. Box 1210
Glenwood Spring, Colorado 81601 - USA

C A P I T U L O I I I

C A R A C T E R I Z A C I O N D E F L U I D O S S E U D O P L A S T I C O S

Racionalismo, una pirámide que descansa sobre su cúspide; empirismo, sobre su base (BERTRAND RUSSELL, La sabiduría de Occidente).

C A P I T U L O I I I

CARACTERIZACION DE FLUIDOS SEUDOPLASTICOS

3.1. - INTRODUCCION

Tanto en las aplicaciones industriales como en las científicas se emplean medidas cualitativas y - cuantitativas de la viscosidad, que se relacionan con - otras características, tales como : grado de polimeriza- ción, homogenización, emulsificación, concentración de - cristales, pureza, color, granulometría, influencia en - las operaciones de proceso, calidad, etc., y que permi- ten inferir el comportamiento del fluido en diversas cir- cunstancias.

La tradición de empleo de estos conceptos y una cierta generalización de los trabajos de reometría - basados en instrumentos capilares y rotacionales de ca- racter arbitrario (modelo del proceso en el mejor de los casos) hacen que el concepto de función reológica no sea empleado en la industria, en la que está muy poco difun- dida la caracterización de fluidos por medio de los pará- metros reológicos, utilizándose caracterizaciones visco- sas cualitativas que se ayudan con otros conceptos, como punto de gota, de fusión, etc.

En este capítulo se analizan los criterios - de viscosidad y de caracterización reológica con objeto

de establecer una sistemática de esta última que, basada en un método científico cuantitativo y sistemático, permita obtener resultados de utilización directa en los trabajos de ingeniería de los fluidos pseudoplásticos.

3.2. - DIVERSOS CRITERIOS DE VISCOSIDAD

Es frecuente la utilización industrial de los conceptos de viscosidad aparente (fig. 3.1.) y viscosidad diferencial :

$$\mu_{ap} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \qquad \mu_{dif} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha'}$$

ambos definidos en un punto del reograma.

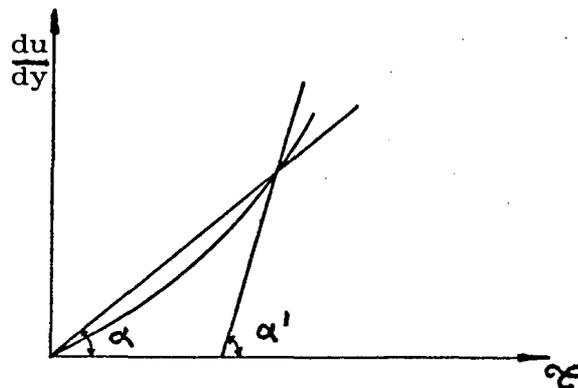


Figura 3.1.

Para un fluido que sigue la ley de OSTWALD ambas quedan definidas como :

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{du/dy} = K^{1/n} \dot{\gamma}^{(n-1)/n}$$

$$\mu^{\text{dif}} = \frac{d\tau}{d(\frac{du}{dy})} = K \cdot n \left(\frac{\tau}{n}\right)^{\frac{n-1}{n}} = n \cdot \mu_{\text{ap}}$$

cuando (du/dy) tiende a cero. En el caso de un fluido newtoniano, $n = 1$, se verifica que :

$$\mu^{\text{dif}} = n \cdot \mu_{\text{ap}}$$

Si las zonas de gradientes de velocidad que se presentan son de pequeña amplitud o están en la parte asintótica del reograma, se realiza una linealización (del comportamiento plástico). En este dominio lineal, la pendiente queda como único parámetro significativo (viscosidad) (fig. 3.2.). La linealización para valores asintóticos también puede hacerse para gradientes de velocidad tendentes a cero o a infinito (fig. 3.3), dando origen a funciones del tipo :

$$\tau = g\left(\frac{du}{dg}\right) \text{ con } g = \mu\left(\frac{du}{dy}\right), \text{ y } \frac{du}{dy} = h(\tau) \text{ con } h = 1/\mu$$

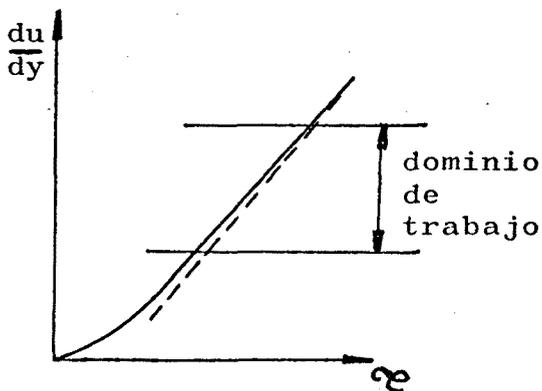


Figura 3.2.

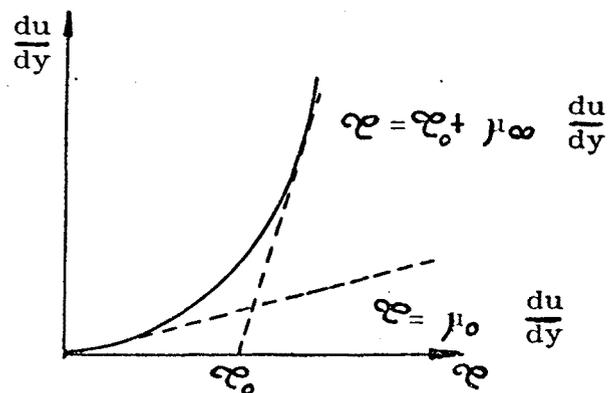


Figura 3.3.

En la caracterización de soluciones es frecuente la definición y empleo de (1,2,3,6,7) : viscosidad relativa o relación de viscosidad en el caso de soluciones :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} ;$$

viscosidad específica : $\mu_{\text{esp}} = \mu_r - 1 ;$

número de viscosidad o viscosidad específica reducida :

$$\frac{\mu_{\text{esp}}}{c} = \frac{\mu_r - 1}{c} ;$$

número de viscosidad logarítmica o viscosidad inherente :

$$\log \frac{\mu_r}{c} = 2,3 \log \frac{\mu_r}{c} ;$$

límite de viscosidad o viscosidad intrínseca :

$$(\mu) = \left(\frac{\mu_{\text{esp}}}{c} \right)_{c \rightarrow 0}$$

número límite logarítmico de viscosidad :

$$(\mu_p) = \left(\frac{\ln \mu_r}{c} \right)_{c \rightarrow 0}$$

La utilización de logaritmos en estos conceptos de viscosidad busca una linealización de la función que representa la evolución experimental observada.

En la tabla I se presentan expresiones que relacionan las variaciones de viscosidad con las de concentración, resaltando la complejidad de los modelos teóricos frente a los empíricos (1,2,3,6,7).

En la tabla II se dan las expresiones que relacionan viscosidad con temperatura; de igual manera los modelos teóricos son más complejos que los empíricos (1,4,5,8).

TABLA I - EXPRESIONES DE LA VISCOSIDAD EN FUNCION DE LA CONCENTRACION

EXPRESION EMPIRICA	EXPRESION TEORICA
$\mu = A \cdot 10^{B \cdot c}$ $\frac{\mu}{\mu_0} = A + B \cdot c$ $\log \mu = A + B \cdot c$ $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + A \cdot c_v + B \cdot c_v^2 + \dots$ $\mu_r = 1 + A \cdot \beta + \dots$ $\mu_r = 1 + [\mu] \cdot c + B' \cdot c^2$ $[\mu] = K \cdot M^x$ $\ln \frac{\mu_r}{c} = \frac{\mu_r - 1 - 1/2 [\mu_r - 1]^2 + 1/3 [\mu_r - 1]^3}{c}$ $\frac{\mu_{esp}}{c} = [\mu] + K [\mu]^2 \cdot c$	$\mu_r = \sum_1^j \frac{\alpha_n \cdot \beta_n}{\alpha_n \cdot \mu_0} \frac{\text{sen } h^{-1}(\beta_n \cdot \dot{D})}{\beta_n \cdot \dot{D}} + x_0$ $\mu_0 = \frac{\mu}{\alpha} \frac{\text{sen } h^{-1}(\beta \cdot \dot{D})}{\beta \cdot \dot{D}}$ $\frac{\mu_{esp}}{c} = \sum_1^j \frac{\alpha_n}{c} \left(\frac{\beta_n}{\alpha_n \cdot \mu_0} \frac{\text{sen } h^{-1}(\beta_n \cdot \dot{D})}{\beta_n \cdot \dot{D}} - 1 \right)$ $\ln \frac{\mu_r}{c} = \frac{1}{c} \ln \left[x_0 + \frac{x_1 \cdot B}{\alpha_1 \cdot \mu_0} + \sum_2^j \frac{\alpha_n \cdot \beta_n}{\alpha_n \cdot \mu_0} \frac{\text{sen } h^{-1}(\beta_n \cdot \dot{D})}{\beta_n \cdot \dot{D}} \right]$
	<p>NOTACIONES</p> <p>c = concentración</p> <p>c_v = concentración en volumen</p> <p>M = peso molecular</p> <p>α₁ = función del polímero disuelto</p> <p>B¹ = interacción soluto solvente</p> <p>β_n = funciones de la estructura de repartición molécula del fluido en reposo y en movimiento y del esfuerzo cortante</p> <p>Ḑ = gradiente de velocidades</p> <p>x, x' = desplazamientos de las unidades de fluido.</p>

TABLA II - EXPRESIONES DE LA VISCOSIDAD EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

EXPRESION EMPIRICA	EXPRESION TEORICA
$\mu = A \cdot 10^{BT}$; $\log \mu = \log A + B \cdot T$ $\mu = A \cdot 10^{B(1/T)}$ (ANDRADE) $\mu = A \cdot T^B$ Otros tipos de funciones	$\mu_m = \text{cte.} \cdot M \cdot T_m \cdot \gamma^{2/4}$ (líquidos monomoleculares) $\mu = \text{cte.} \cdot \exp(E/RT)$ (ANDRADE) $\mu \nu^{1/3} = \text{cte.} \cdot \exp(E/\nu RT)$ (ANDRADE generalizada) $\mu = \frac{hN}{V} \exp\left(-\frac{\Delta S}{R}\right) \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right)$ (EYRING) $\mu = \text{cte} \exp(EV/RT)$ (EYRING simplificada, ANDRADE) $\lg^2 \mu(T) = [a(Rm) + b] / \nu(T) - 2,9$ (SANDERS - LOGEVAERT) $\mu = A \exp(BV_0/\nu T)$ (DOOLITTLE - bajas temperaturas,*) $\mu = 11 \cdot \left(\frac{RT}{M}\right)^{1/2} \cdot r \cdot e \cdot (e^e)^{1/3} \exp\left(-\frac{\Delta S}{R}\right) \exp\left(\frac{E_c}{RT}\right) [1 - \exp(-\frac{E_c}{RT})]^n$ (PAICHENKOV)** $\mu = \frac{1}{30} \int \nu \cdot r \cdot e^e \cdot dr$ $\mu = \exp[-(\theta T)]^{***}$ $\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{E}{KT} - \frac{E}{KT_0}\right)$ (ARRHENIUS)
<p>NOTACION</p> <p>ρ = densidad</p> <p>v = volumen de vander Waals/volumen molar a T</p> <p>M = peso molecular</p> <p>A, B = constantes</p> <p>T = temperatura</p> <p>T_m = temperatura de fusión</p> <p>V = volumen molar</p> <p>V₀ = volumen molar a 0 °K</p> <p>V_f = volumen libre de ocupación</p> <p>v = volumen específico</p> <p>v_m = volumen de la molécula</p> <p>E, ΔH = energía de activación, flujo viscoso</p> <p>ΔE_v = calor de vaporización, energía de activación</p> <p>ΔS = entropía de activación</p> <p>N = número de Avogadro</p> <p>R = constante de los gases</p> <p>h = constante de Plank</p> <p>k = constante de Boltzmann</p> <p>r = distancia entre moléculas</p> <p>e = potencial entre moléculas (Senard-Jones)</p> <p>R_m = refracción intermolecular (distancia)</p> <p>n = nº. de átomos del esqueleto molecular</p> <p>ν = nº. de coordinación molecular</p> <p>ν = perturbación introducida por el gradiente de velocidades.</p>	<p>* V₀/νT = E k/T altas temperaturas</p> <p>** e = $\frac{2E_v}{V}$</p> <p>*** e = e(T)</p>

La mayoría de las expresiones teóricas han sido desarrolladas para casos específicos (PANCHENKOV lubrificantes orgánicos, DOOLITTLE bajas temperaturas), y no son de aplicación general.

Es de interés la expresión de ANDRADE, de fundamento teórico y empírico :

$$\mu = \text{cte.} \cdot \exp \frac{E}{RT} ;$$

deducida de la ley de EYRING (6,9). La entropía de actuación* se puede calcular de $E/R = d \ln \mu / d 1/T$, es decir de la pendiente de la recta $\log \mu - 1/T$, siendo así posible diferenciar entre energía de activación a gradiente de velocidad constante o a esfuerzo cortante constante.

3.3. - APLICACION A LOS FLUIDOS SEUDOPLASTICOS

Partiendo de la representación de OSTWALD para los fluidos seudoplásticos y por analogía con las expresiones enunciadas en el apartado anterior para la viscosidad, se pueden expresar las variaciones con la temperatura de los parámetros reológicos característicos de la manera siguiente (4,6,8,9,11,12,13) :

 NOTA : La entropía de activación E o energía necesaria para que una partícula pase de una posición de equilibrio a un hueco preexistente en el fluido.

$$n = \beta t + n_0 \quad ; \quad K = K_0 \exp \alpha t_0$$

siendo α y β funciones del soluto y de la edad de preparación de la solución.

Esta expresión del índice de consistencia es análoga a la de la viscosidad de ANDRADE del tipo :

$$K = K_0 \exp \frac{E}{RT}$$

también ARRHENIUS :

$$K_T = K_{T_0} \exp \left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

Esta forma general de expresión permite representaciones gráficas para la explotación de los resultados de caracterización reológica de los fluidos de una manera sistemática, teniendo, además, un origen teórico que justifica el comportamiento del fluido a un nivel molecular, visión microscópica en la que no se incidirá.

Por analogía con los criterios de viscosidad empleados en las soluciones (9,11,12,13), se expresa :

$$\lg \frac{K}{\mu} = \lg \left(B(T) \cdot c^{\beta(T)} \right) \quad ; \quad 1 - n = \alpha(T) c^r$$

(1-n) evidencia la separación del comportamiento newtoniano, $n=1$. Estas dos últimas expresiones dan representaciones gráficas lineales si se expresan las variables en coordenadas logarítmicas.

En la literatura, es frecuente este tipo de representación o análogas (9,10,11,12,13,14,15). FITO, - ESCARODINO, MOLINA, con CMC y pectina, relacionando las características reológicas con la concentración, empleando :

$$n = a - b \log c$$

$$\log K = \log a' + b' \log c \quad ; \quad K = a' c^{b'}$$

a' , b' , a , b , constantes funciones del polímero, independientes del soluto. Trabajan también con la característica reducida :

$$K - \mu = a' c^{b'}$$

u viscosidad del soluto puro.

NEDONCHELLE y SCHUTZ, con almidón y sobre las expresiones de ANDRADE y EYRING, determinan la energía de activación a gradiente de velocidades constante E_D , - que se relaciona con la energía a esfuerzo cortante constante E_{∞} y con el índice de pseudoplasticidad $E_D = n E_{\infty}$ - empleando :

$$K = K_0 \exp \frac{E_D}{RT}$$

En el mismo sentido se han realizado los trabajos de MOORE y SANDERSON.

Esta última expresión del coeficiente de consistencia evoluciona en la literatura hasta llegar al -

concepto de variable reducida o referida, a temperatura o concentración dada, y con el fin de evitar el concepto de energía de activación.

Con derivados celulósicos hidrosolubles, CMC, MEC (hidroxietil-celulosa), carbopol y derivados poliméricos de etileno trabajan THIRRIOT, BELLET, SANGELIN y - también MIZUSMINA y KURIWAKI, empleando expresiones análogas a las citadas.

Es interesante introducir un análisis termodinámico en la caracterización de fluidos no newtonianos, partiendo de la relación implícita :

$$F(p, T, \rho, n, K, c, i, S, \dots) = 0$$

o ecuación de estado, que engloba los parámetros termodinámicos que no son independientes entre sí.

Para el caso simple y frecuente de un fluido pseudoplástico, se reduce a :

$$F = (T, c, n, K) = 0 \quad \text{ó} \quad G(T, c, \tau, \frac{du}{dy}) = 0$$

Los cuatro parámetros son suficiente, pudiéndose considerar estos parámetros de estado como funciones de estado de los otros dos, siempre que las variaciones concomitantes de ellos sean suficientemente sensibles, es decir - significativas del estado y no debidas a la imprecisión de las medidas (10,11,12,13,14,15((fig. 3.4.)).

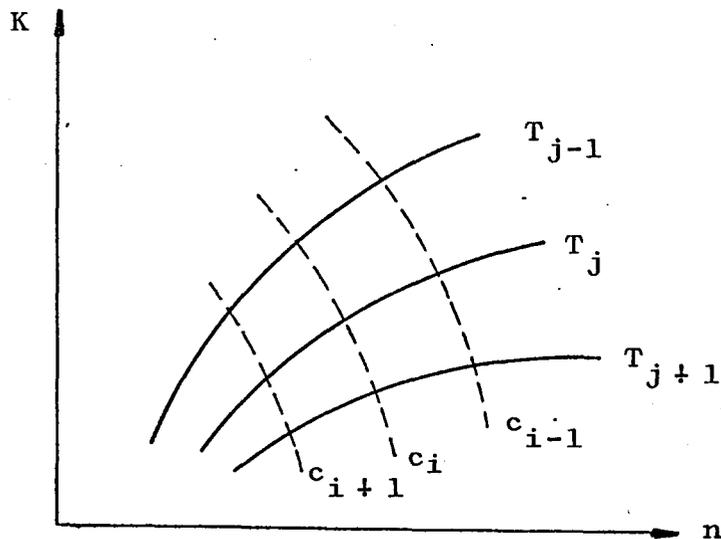


Figura 3.4.

El número de parámetros aumenta con la complejidad del modelo de comportamiento reológico adoptado. La regla de GIBBS, en el caso de soluciones de dos componentes, soluto y solvente, que forman una sola fase líquida, de tres grados de libertad; uno de ellos, la presión, no es utilizable por no incidir en el comportamiento reológico. Los dos restantes pueden ser los coeficientes reológicos de la ley de OSTWALD, n y K , que quedan ligados a las otras variables por la ecuación de estado. Alcanzada esta situación, se puede predecir el comportamiento de mezclas de soluciones a concentraciones diversas.

3.4. - ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.4.1. - PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

Para abordar el estudio hidrodinámico de los fluidos no newtonianos de comportamiento pseudoplástico se emplean soluciones de CMC (carboximetilcelulosa), varie

dad 12 M 8 F, la de más alto peso molecular. Sobre este polímero se realizan las experiencias de caracterización reológica del comportamiento pseudoplástico.

Por medio del reoviscosímetro cono-plato FERRANTI se han obtenido los reogramas de forma directa. A través de una transformación a coordenadas logarítmicas se ajustan los reogramas experimentales a la ley exponencial de OSTWALD, de WAELE-NUTTING, por el método de los mínimos cuadrados, obteniéndose los parámetros característicos, K, coeficiente de consistencia, y n, índice de pseudoplasticidad (capítulo I y II), para cada uno de ellos).

En el ajuste de los diversos reogramas experimentales se ha empleado un programa en lenguaje BASIC que suministra los dos coeficientes indicados más una serie de variables reducidas de interés en este estudio. En el anejo A se presenta el programa.

Además de los coeficientes reológicos, se ha observado que son variables la concentración, en peso, la temperatura y la edad de preparación de la muestra, para cada reograma realizado.

Las concentraciones empleadas son 0,53 - 0,69 - 0,78 - 0,87 - 0,97 - 1,03 - 1,14 - 2 - 3,5 - 5% influyendo, ésta, en el grado de pseudoplasticidad y en la consistencia del fluido (espesamiento).

En los líquidos, la temperatura tiene una fuerte influencia en las variables de viscosidad (teoría de EYRING) que relaciona la viscosidad con el grado de -

GRADIENTE DE VELOCIDAD du/dy

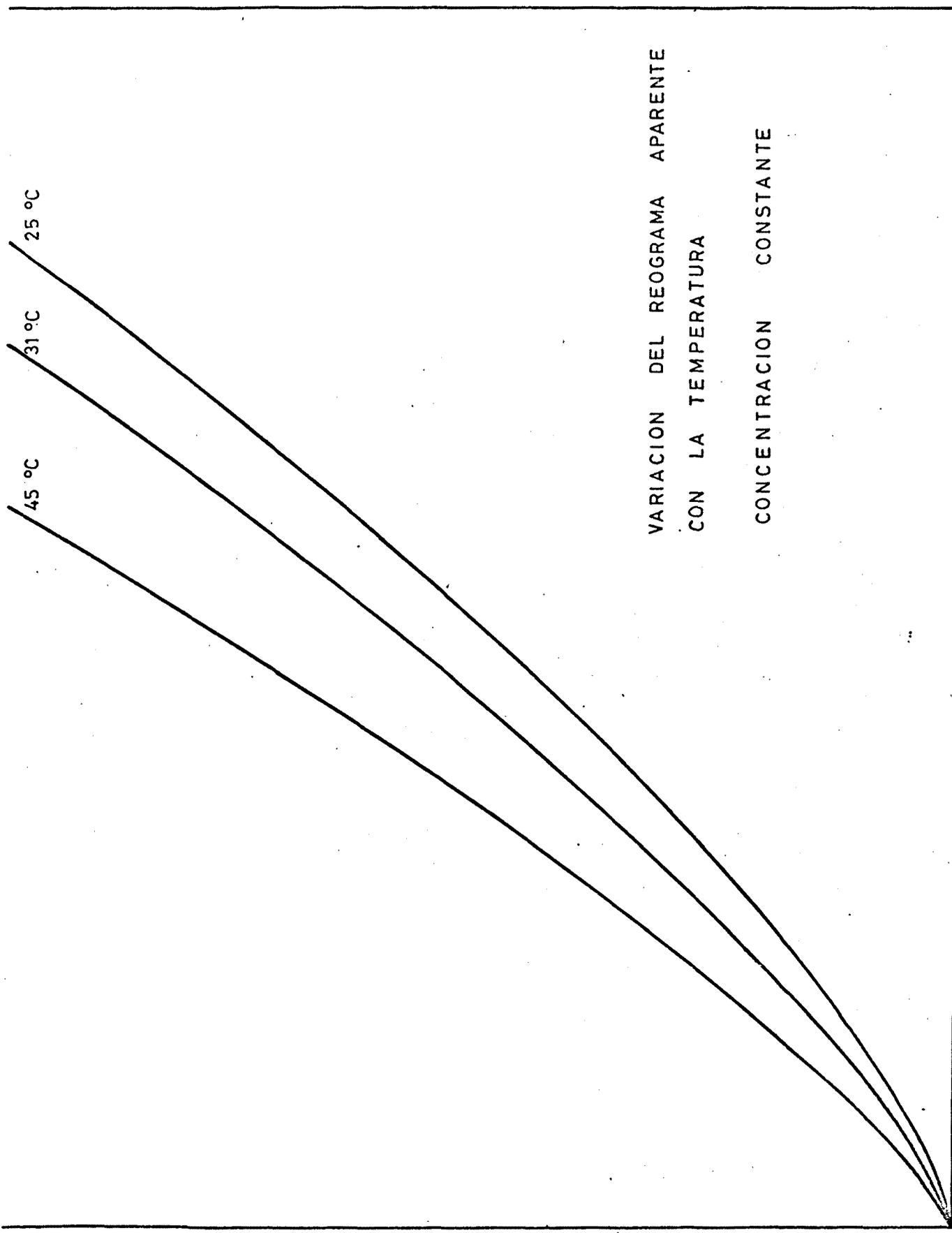


Fig.3.5

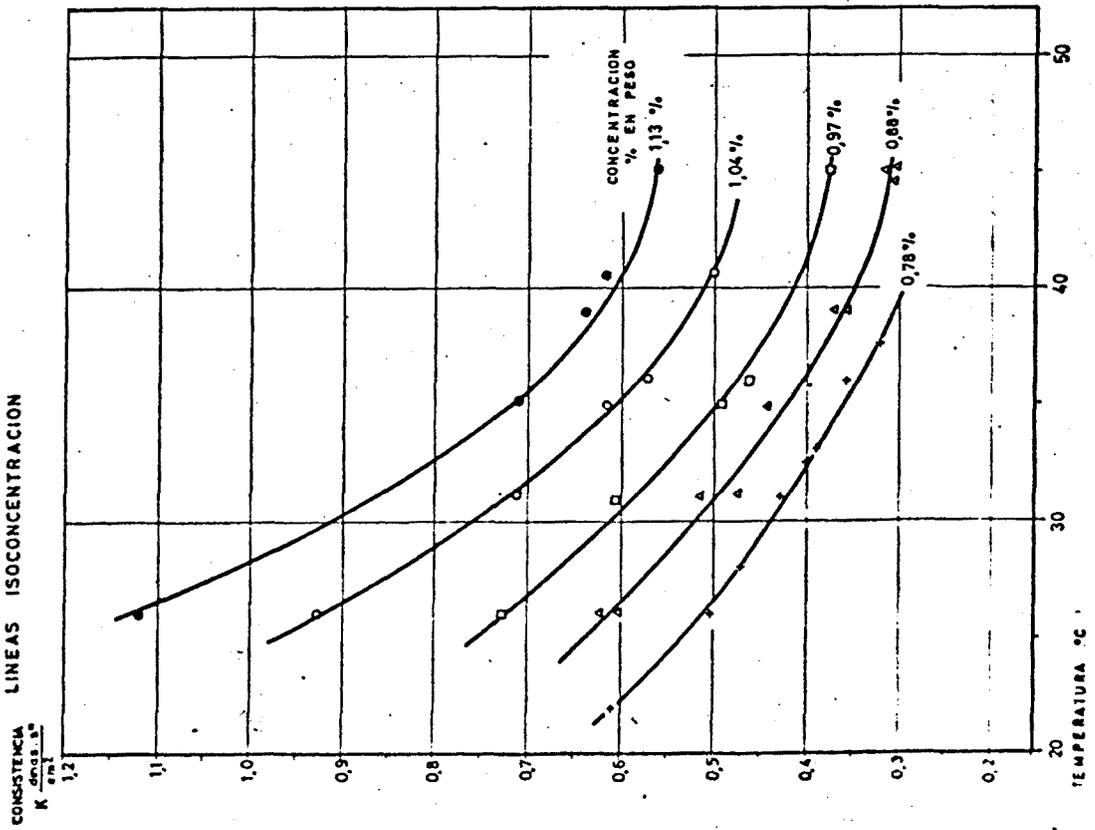
VARIACION DEL REOGRAMA APARENTE CON LA TEMPERATURA
CONCENTRACION CONSTANTE

CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO

— DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA —

VARIACION DE LA CONSISTENCIA K
CON LA TEMPERATURA

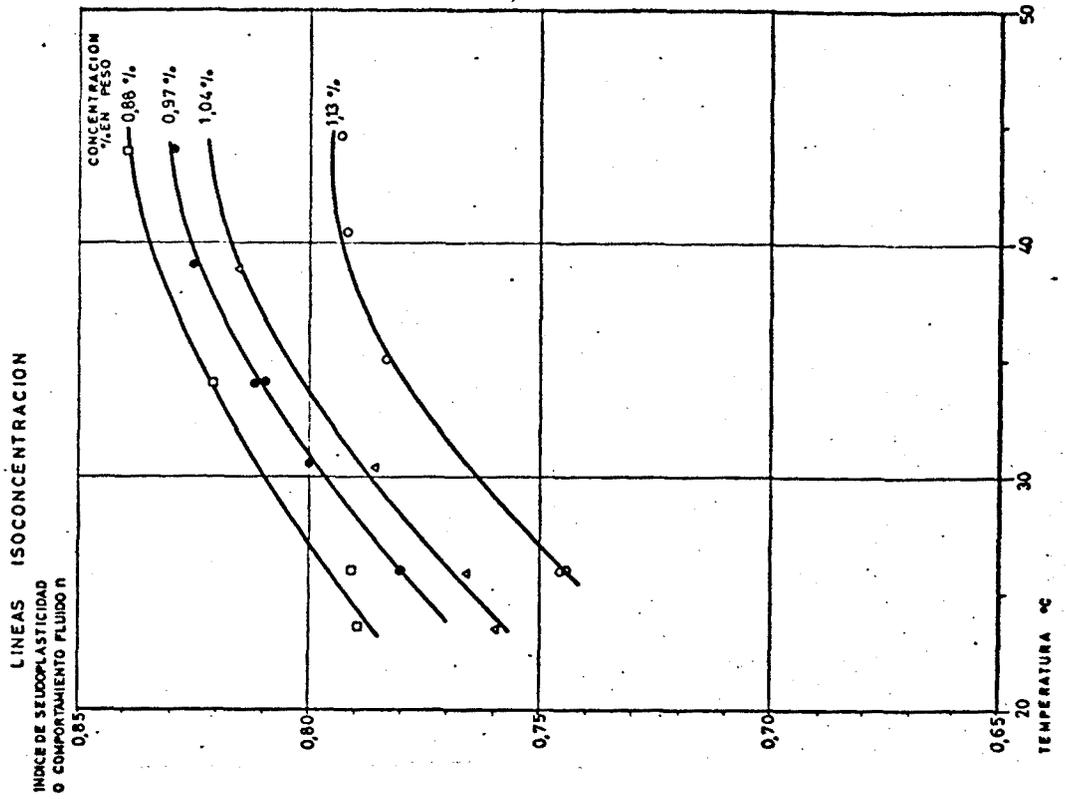
Fig.3.6



CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
— DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA —

VARIACION DEL INDICE DE SEUDOPLASTICIDAD n
CON LA TEMPERATURA

Fig. 3.7



seudoplasticidad, es decir, una aproximación a $n = 1$, caso newtoniano.

En la figura 3.5., el incremento de temperatura desplaza el reograma hacia la izquierda, es decir, el índice de consistencia disminuye, de igual manera que en un líquido newtoniano disminuye la viscosidad. La figura 3.6. representa la evolución del índice de consistencia para concentraciones dadas, y en él, también se aprecia una disminución de la consistencia ("viscosidad") al aumentar la temperatura.

La teoría de EYRING confirma esta disminución del comportamiento pseudoplástico y posiblemente su justificación sea la rotura de las cadenas macromoleculares - al aumentar la agitación molecular con el incremento de temperatura. Esta rotura es transitoria y desaparece al cesar la elevación de la temperatura.

La evolución del reograma aparente de obtención directa a temperatura dada y concentraciones diferentes se presenta en la fig. 3.8. El reograma directo - se desplaza a la derecha al aumentar la concentración, - es decir (fig. 3.10), el coeficiente de consistencia - aumenta con la concentración. El índice de pseudoplasticidad disminuye al aumentar la concentración: aumento de curvatura en los reogramas al aumentar la concentración en la fig. 3.8 y evolución del índice de la fig. 3.9. El espesamiento del fluido, es decir, un mayor número de macromoléculas presentes en el solvente da un incremento de pseudoplasticidad.

La evolución temporal del carácter reológico de una solución dada, desde el momento de su preparación, viene representada, en la fig. 3.11, por los reogramas - directos de la solución a tiempos diferentes y a igualdad de concentración y temperatura.

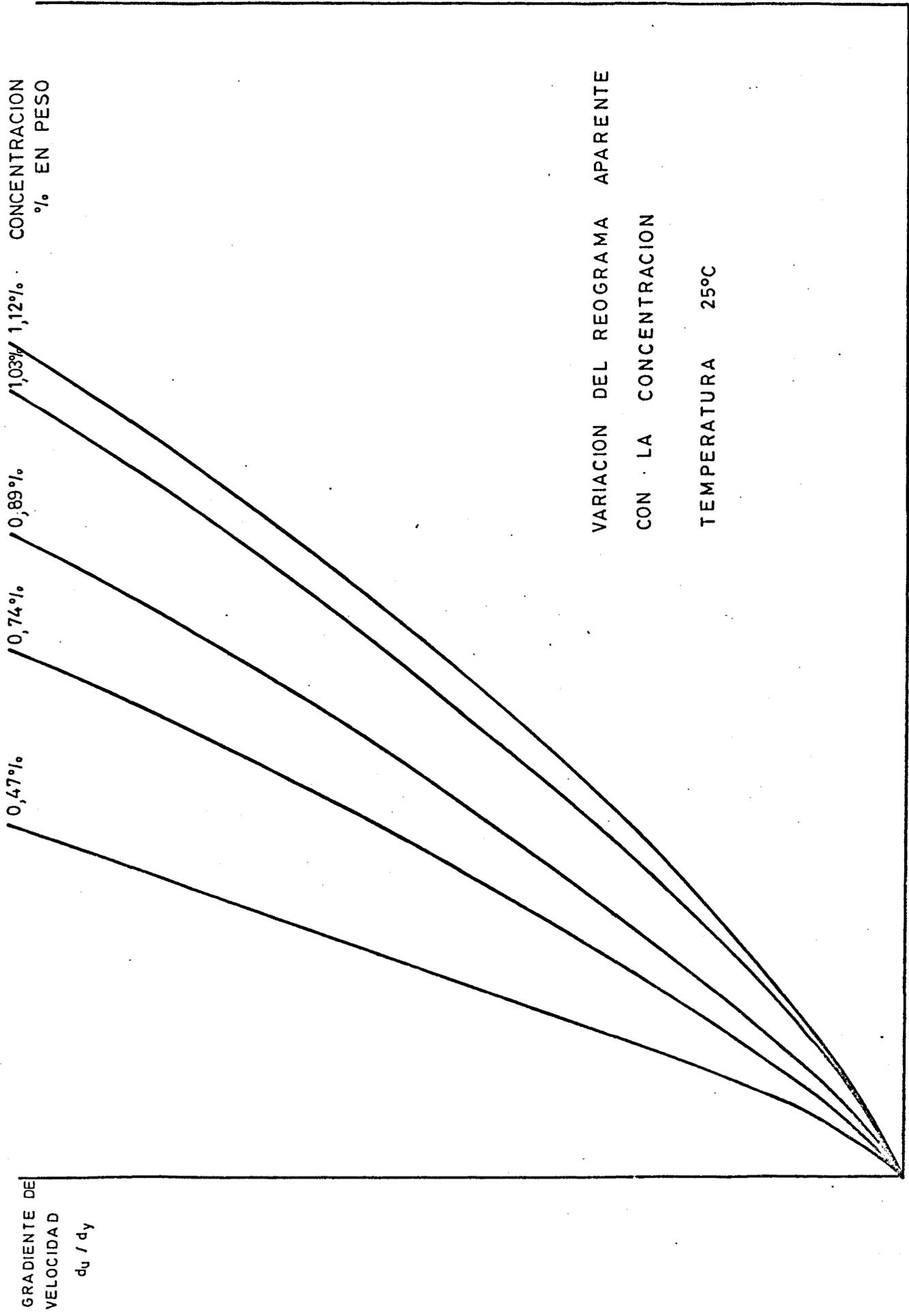
En la fig. 3.12 se da la variación de algunos reogramas a tiempos diferentes de una misma concentración. En la representación se han adoptado coordenadas logarítmicas, manteniendo los valores aparentes de las magnitudes en los reogramas directos.

Las figuras 3.13 y 3.14 dan la variación de los parámetros reológicos K y n con el tiempo para concentraciones diferentes. El incremento del índice de seudoplasticidad con el tiempo y el decremento del coeficiente de consistencia están de acuerdo con la evolución de los reogramas en las figuras 3.11 y 3.12: disminución de curvatura o de pendiente y desplazamiento hacia la izquierda o disminución de la coordenada en el eje, respectivamente, al aumentar el tiempo transcurrido desde la preparación de la solución.

Han sido puestas de evidencia observaciones de envejecimiento: en la leche coagulada, por SCOTT-BLAIR y por TUSZYNSKI; en los compuestos hidrocarbonados (almidón), por NEDOUNCHELLE y SCHUTZ; y en los derivados celulósicos (CMC y HEC), de etileno (Polyox) y otros polímeros, por THIRRIOR, BELLET y SANGELIN.

Inicialmente se observa en la solución un comportamiento anómalo, aproximadamente durante las primeras 24 horas y en función de la concentración en peso,

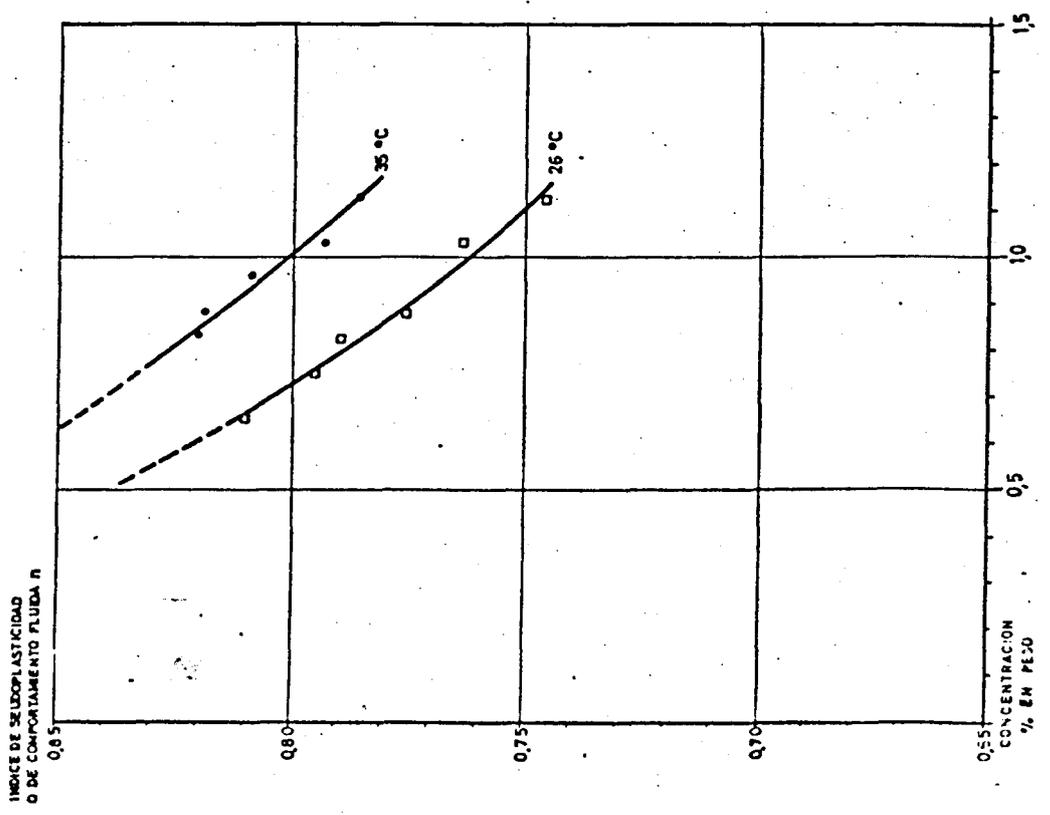
Fig. 3.8



CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 --- DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA ---

Fig. 3.9

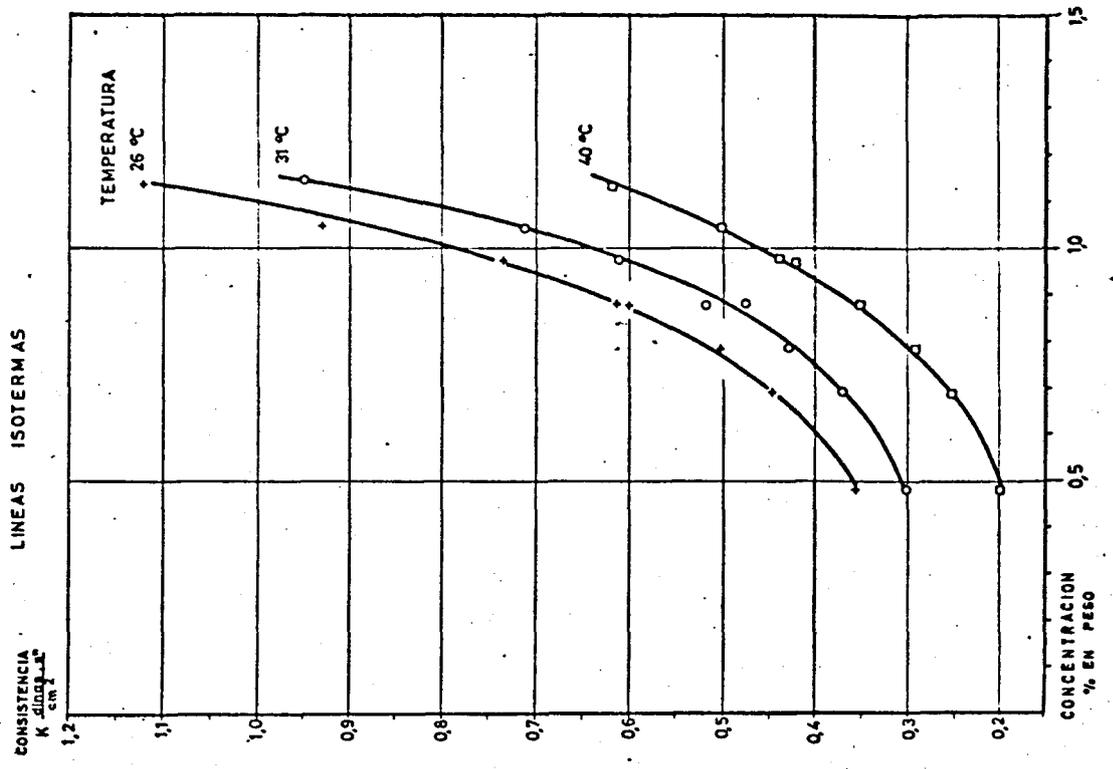
VARIACION DEL INDICE DE SEUDOPLASTICIDAD n
 CON LA CONCENTRACION
 LINEAS ISOTERMAS



CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 --- DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA ---

Fig. 3.10

VARIACION DE LA CONSISTENCIA K
 CON LA CONCENTRACION
 LINEAS ISOTERMAS



durante el cual se manifiesta como una recuperación de la fuerte y larga agitación sufrida durante la preparación y presenta unas características reológicas que se distribuyen aleatoriamente alrededor de los valores que parece ser debería de presentarse no observándose ninguna tendencia.

Este fenómeno se justifica por la degradación de las macromoléculas del polímero, que en el transcurso del tiempo van escindiéndose de una manera no reversible, con la consiguiente degradación del comportamiento fluido. Esta "rotura" de las macromoléculas difiere de la ocasionada por las variaciones de temperatura en la reversibilidad de estas últimas. Una vez producida la degradación total de estas macromoléculas, no tiene sentido un comportamiento pseudoplástico, obteniéndose un valor de n igual a la unidad, es decir, el comportamiento newtoniano. Por su parte, la consistencia K evolucionaría hasta reducirse a la viscosidad del fluido de base (en este caso agua), evolución que se puede apreciar en la figura 3.15.

La relación existente entre K y n , a temperatura y concentración dada, siendo variable el tiempo de la preparación de la solución, es del tipo :

$$\ln K = \text{cte}_1 - \text{cte}_2 n$$

$\text{cte}_1 = \ln A$, $\text{cte}_2 = \ln B$, con $A = \frac{1}{B}$, es decir, $K = B^{n-1}$ o también $\ln K = (n-1) \ln B$ tomando A el valor de K para un n hipotético igual a cero. En esta experiencia se cumple que $K = \mu_{\text{agua}} = 1 \text{ cp}$, para $n = 1$. Conocida la evolución de K_0 de n en el tiempo, se puede calcular el valor del otro parámetro.

CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F. EN AGUA -

GRADIENTE
DE
VELOCIDAD
 du/dy

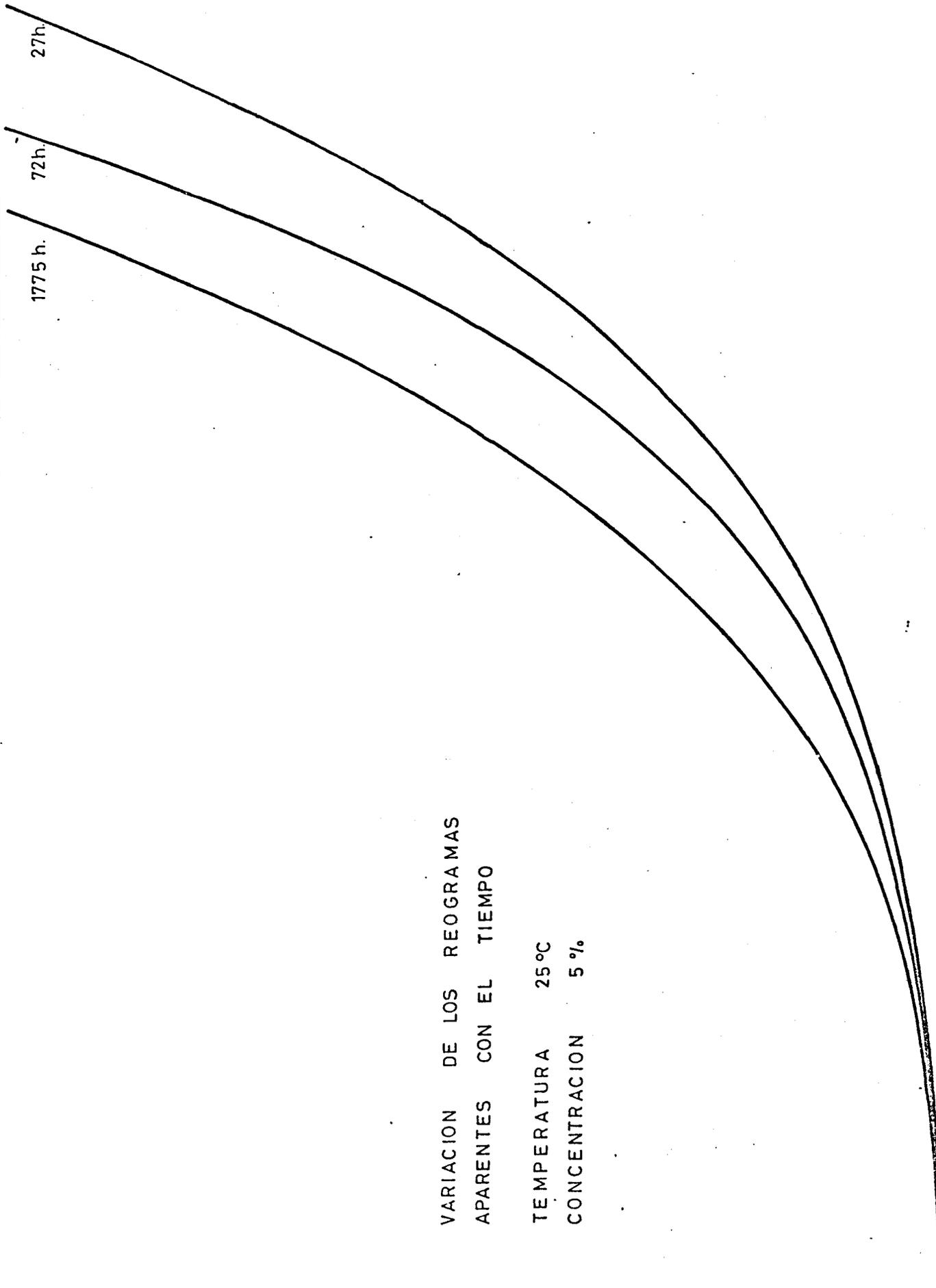


Fig.311

VARIACION DE LOS REOGRAMAS
APARENTES CON EL TIEMPO

TEMPERATURA 25°C
CONCENTRACION 5%

Fig.3.1

VARIACION DE LOS REOGRAMAS APARENTES
 TRANSFORMADOS EN EL TIEMPO

GRADIENTE VELOCIDAD d_u
 EN mm.

TEMPERATURA 25 °C
 CONCENTRACION 5 %

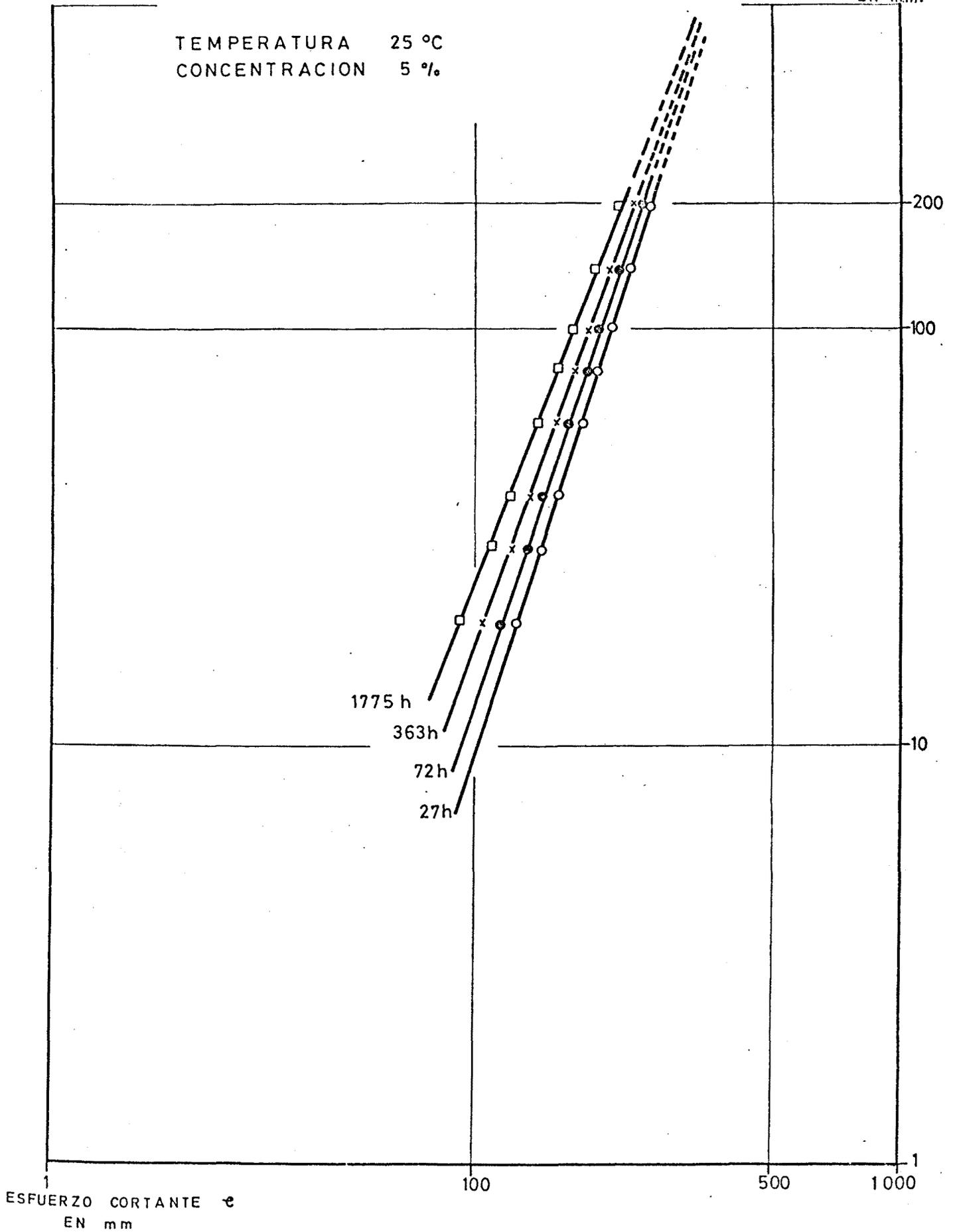


Fig. 3.13

CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

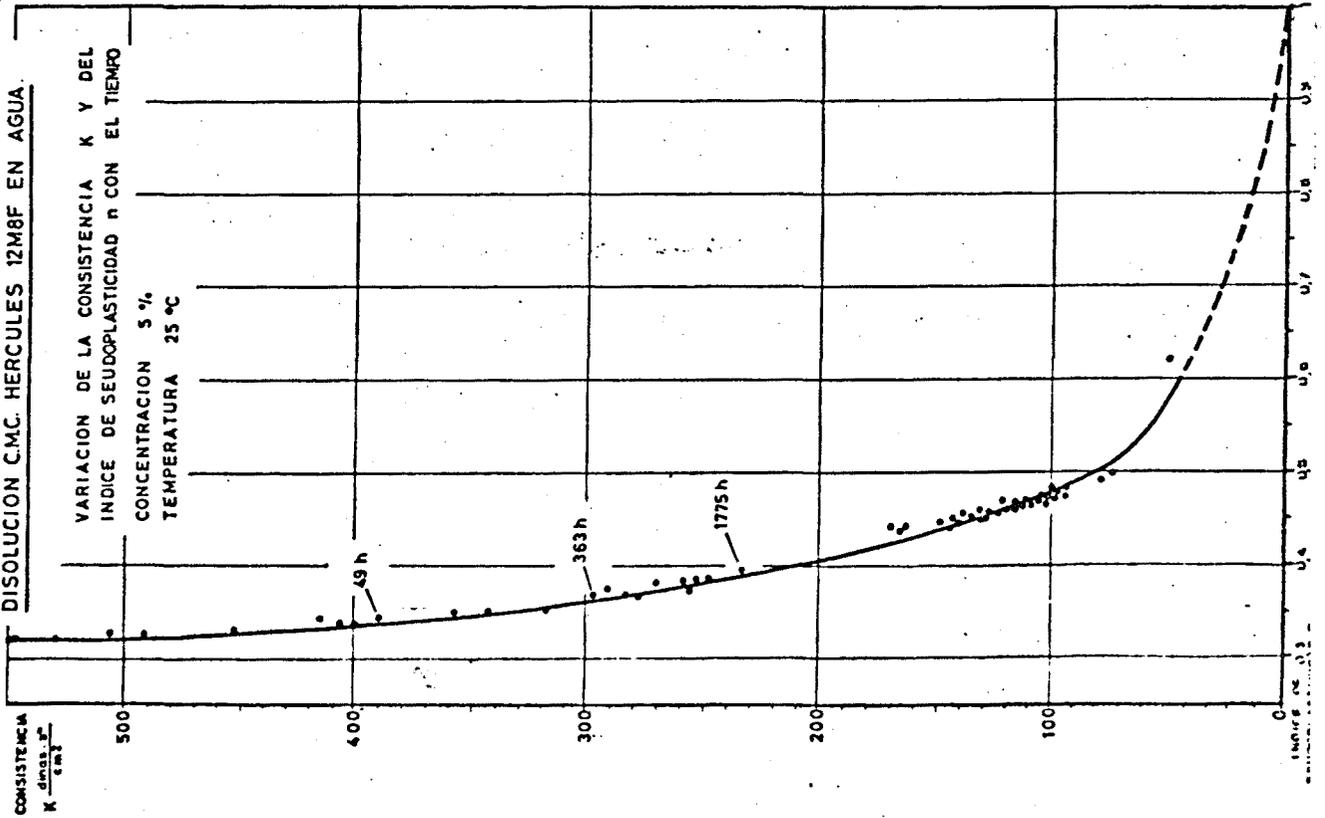
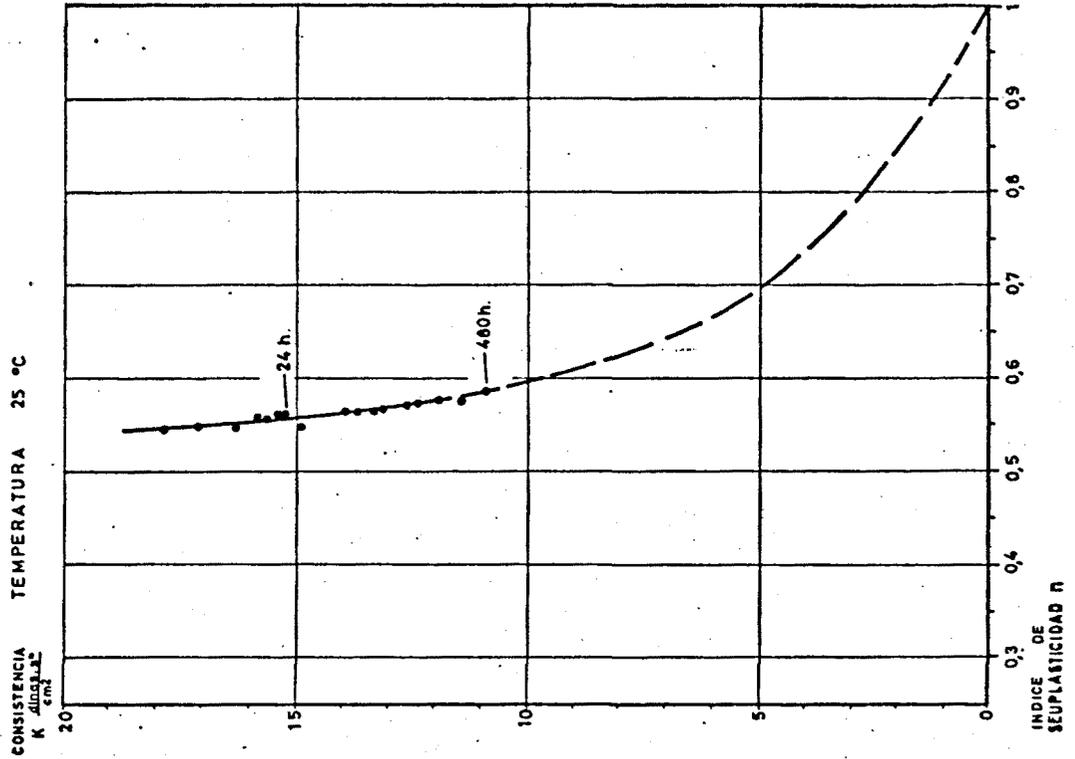


Fig. 3.14

CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

VARIACION DE LA CONSISTENCIA K Y DEL
 INDICE DE SEUDOPLASTICIDAD CON EL TIEMPO
 CONCENTRACION 2%
 TEMPERATURA 25 °C



— CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA —

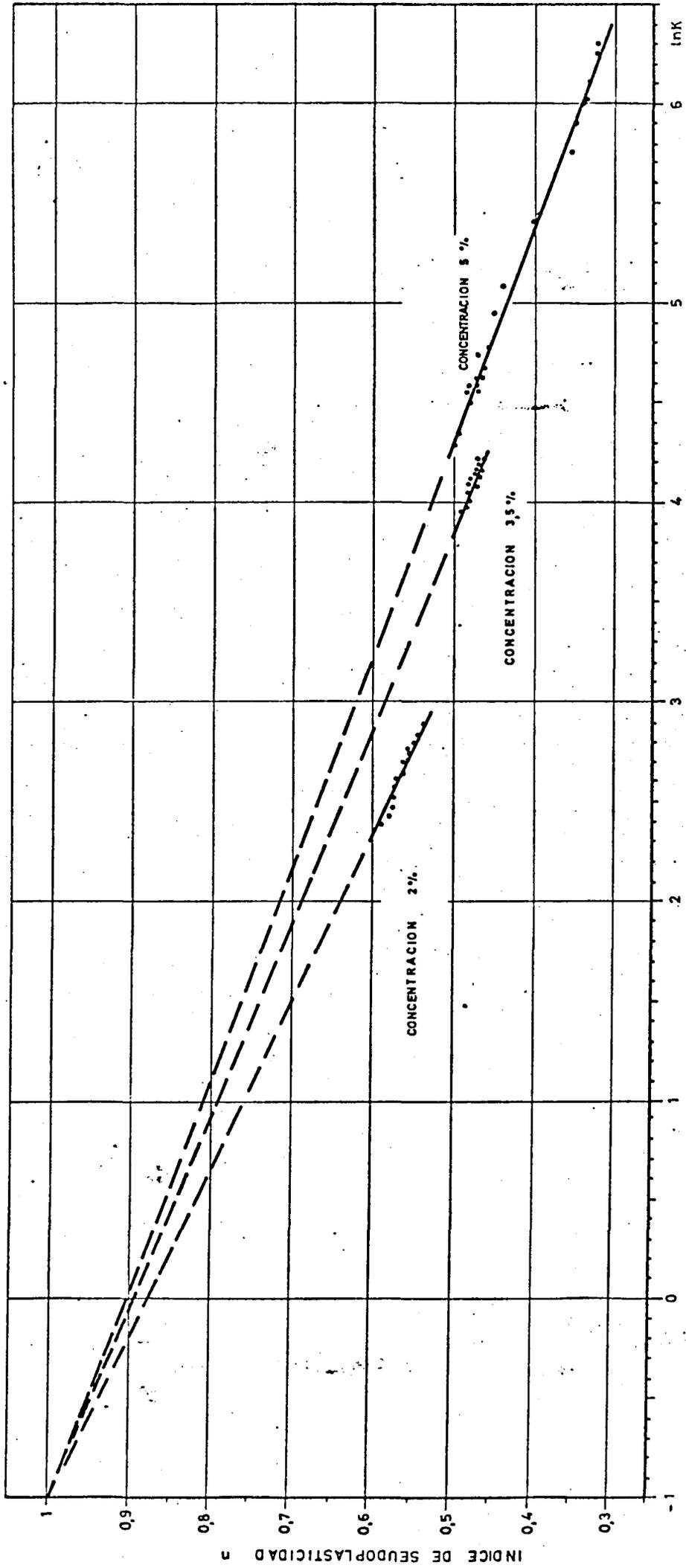
Fig. 3.15

VARIACION DE LA CONSISTENCIA K Y DEL INDICE DE SEUDOPLASTICIDAD n CON EL TIEMPO

TEMPERATURA 25 °C

LINEAS ISOCONCENTRACION

K CONSISTENCIA EN $\frac{\text{dinas} \cdot \text{s}^n}{\text{cm}^2}$



B es un valor menor que la unidad que crece con la concentración y alcanza posiblemente el valor uno para la concentración límite, en la que cesa el comportamiento del fluido pseudoplástico y, en teoría, para concentraciones mayores, toma valores superiores a la unidad, dando un comportamiento dilatante de la solución.

Dimensionalmente se cumple :

$$K = \eta \cdot T^{n-1} = B^{n-1}$$

y queda así explicitada la magnitud tiempo ; ¿tiempo propio de orientación?, ¿tiempo de degradación? La evolución temporal observada de los coeficientes de consistencia K e índice de pseudoplasticidad n viene dada en escalas logarítmicas, en las figuras 3.16 y 3.17.

3.4.3. - SINTESIS DE LA CARACTERIZACION

En el apartado anterior se exponen las tendencias observadas en los resultados experimentales de la caracterización reológica de los fluidos. Las observaciones se han efectuado sobre los reogramas transformados y sobre los mismos ajustados por la ley de OSTWALD, que suministra los dos parámetros : coeficiente de consistencia K e índice de pseudoplasticidad n, viendo la incidencia que en todos ellos tiene la concentración, temperatura y tiempo de preparación.

Fig.3.16
 CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

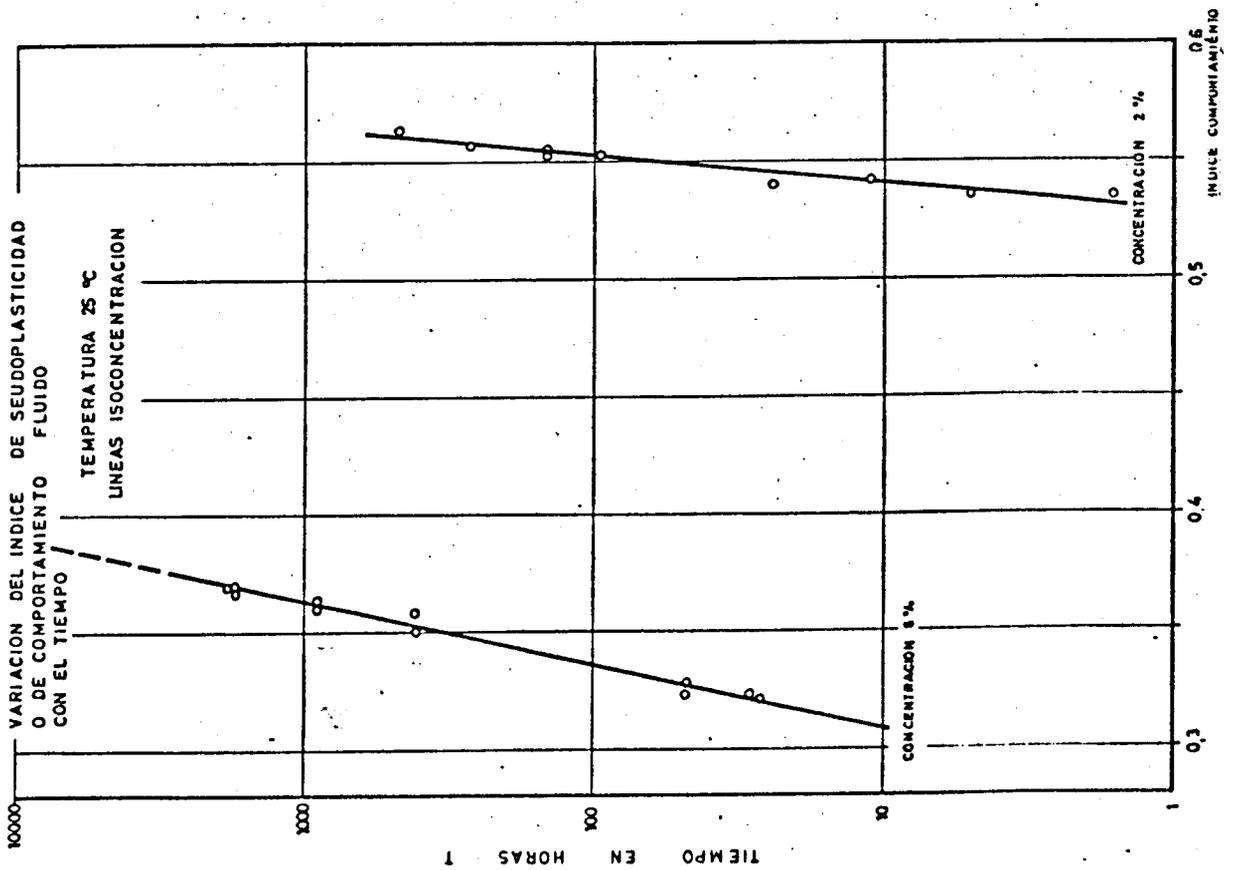
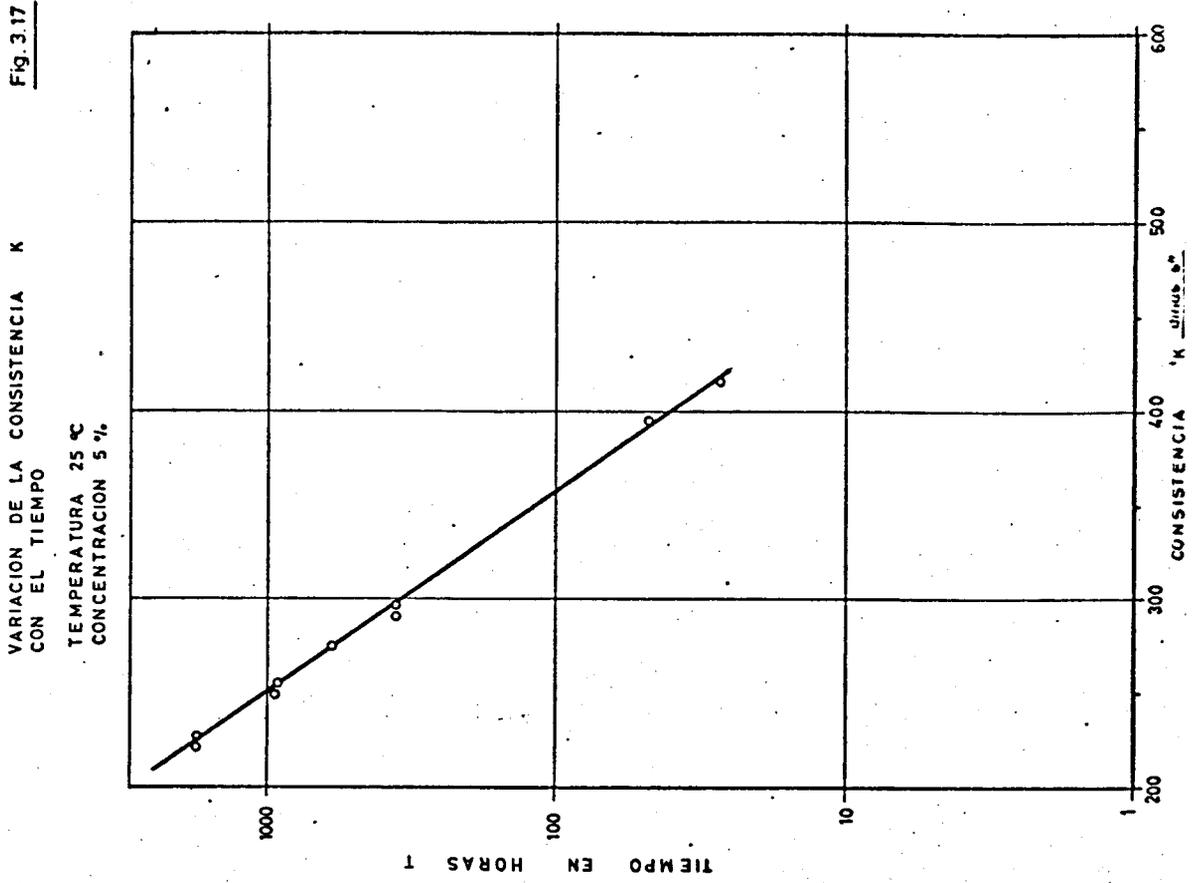


Fig.3.17
 CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA



En este apartado, se estudia, de una forma detenida y cuantificable, la variación de los parámetros reológicos K y n en función de la concentración y temperatura, una vez transcurrido un cierto tiempo desde su preparación. Este tiempo, seis meses, es tal que, dado el periodo requerido para los ensayos de este estudio y que las variaciones temporales de los parámetros reológicos característicos son ya suficientemente lentas se puede considerar a los fluidos estabilizados y realizarse una interpretación termodinámica de los parámetros que definen su carácter pseudoplástico.

La figura 3.18 presenta la variación del logaritmo del coeficiente de consistencia en función de los de temperatura y en condiciones de isoconcentración. La función es lineal y creciente con el inverso de la temperatura.

Tomando como modelo de expresión de ARRHENIUS para la viscosidad del agua :

$$\mu_T = \mu_0 \exp \left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

y, por analogía de los conceptos de viscosidad y coeficiente de consistencia, se expresa :

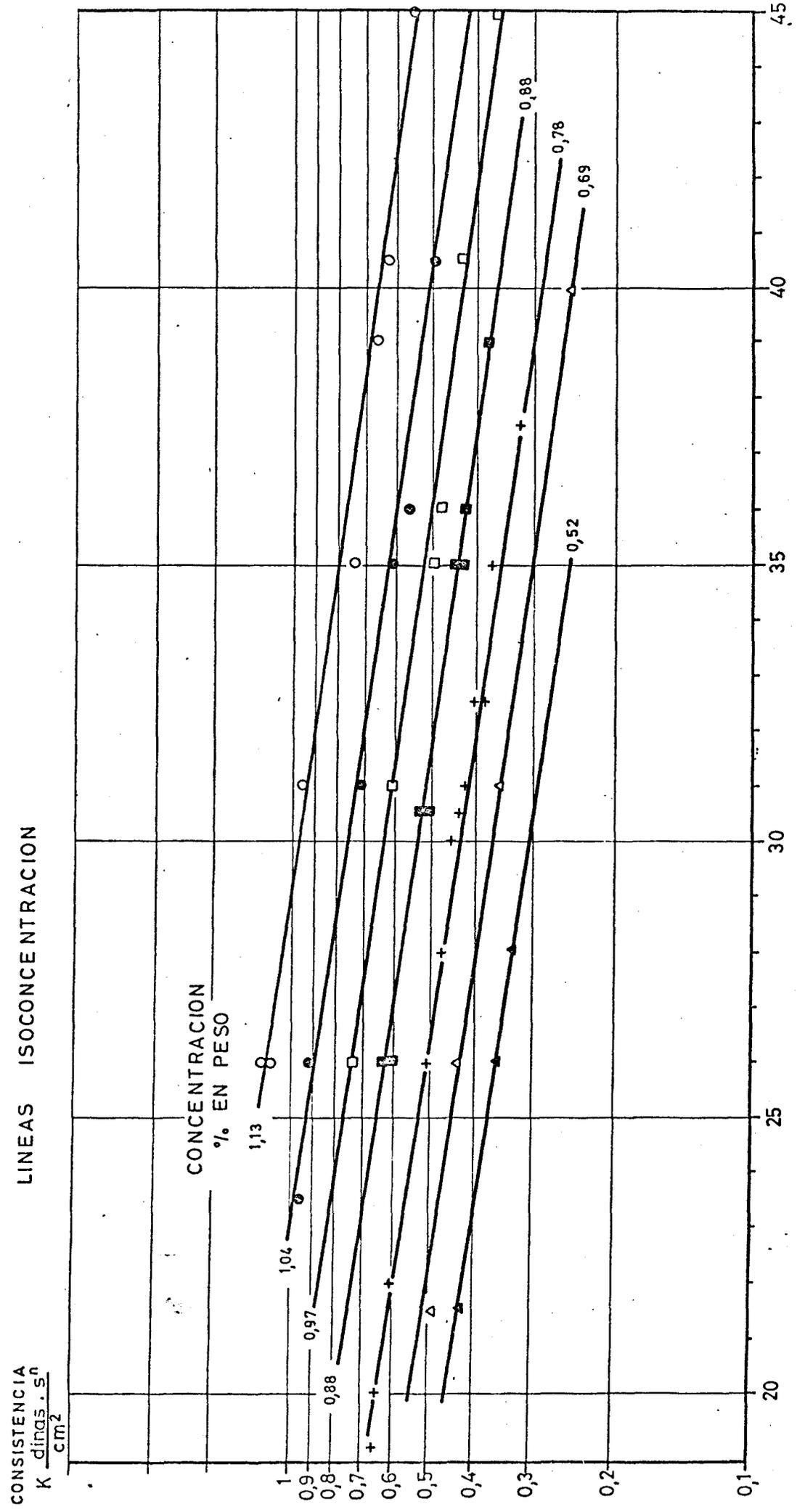
$$K_T = K_0 \exp \left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

Para soluciones de muy baja concentración y dada la preponderancia del solvente en la masa de este valor de la energía de activación del solvente, agua en este caso. - En la literatura se encuentra :

CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 — DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA —

Fig. 3.18

VARIACION DE LA CONSISTENCIA K CON LA TEMPERATURA
 LINEAS ISOCONCENTRACION



$$K_T = K_0 / \left(1 + \beta_0 \frac{T - T_0}{T_0} \right)^n$$

forma análoga a la anterior y propuesta por MIZUSHINA y KURIWAKI con β_0 función del polímero.

El índice de pseudoplasticidad n es una función creciente de la temperatura, fig. 3.7. En muchos estudios se utiliza el valor $(1-n)$, indicativo del alejamiento del comportamiento newtoniano. La evolución de $(1-n)$ es decreciente con la temperatura y del tipo :

$$1 - n = \alpha(T) c^\beta$$

ligada a la concentración.

Los resultados experimentales aquí expuestos y referentes a las variaciones de K están de acuerdo con los observados por THIRRIOT, BELLET y SANGELIN y con los de MIZUSHIMA y KUWAKI. Los primeros autores discrepan de los segundos y de lo aquí apuntado en la por ellos observada no-variación del índice de pseudoplasticidad con la temperatura.

Volviendo a la evolución del coeficiente de consistencia con la temperatura, hay que destacar que éste tiene unas dimensiones de viscosidad newtoniana afectada por una potencia del tiempo :

$$K = F L^{-2} T T^{n-1} = \mu \cdot T^{n-1}$$

siendo, por lo tanto, lógica la variación observada y el tipo de expresión propuesta para su cuantificación.

La influencia de la concentración en la evolución del coeficiente de consistencia viene representada en la fig. 3.19. La representación doblemente logarítmica nos da una relación lineal creciente con la concentración.

La figura 3.20 da la variación del índice de pseudoplasticidad n , o de $(1-n)$, en función de la concentración, representada por una función del tipo ya conocido :

$$1 - n = \alpha (T) c^{\gamma}$$

Para un polímero dado, CMC en este caso, β y γ coinciden sensiblemente. El coeficiente $\alpha(T)$ puede estudiarse descomponiendo (12,13) :

$$\alpha(T) = \frac{p}{T} + q = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

siendo p y q funciones también del polímero.

La representación de un comportamiento o fenómeno por variables reducidas o referidas viene del planteamiento del problema por análisis dimensional. Este tipo de representación es frecuente en la viscosimetría clásica (índices de viscosidad, viscosidades relativas) y en la reometría.

Si se parte de las variables que intervienen, tales como, τ , esfuerzo cortante; du/dy , gradiente de velocidad; n , índice de pseudoplasticidad; K, K_0 , coeficientes de consistencia observado y de referencia; μ, μ_0 viscosidades del solvente en condiciones dadas y de referencia; t , tiempo de envejecimiento, se llega a la de-

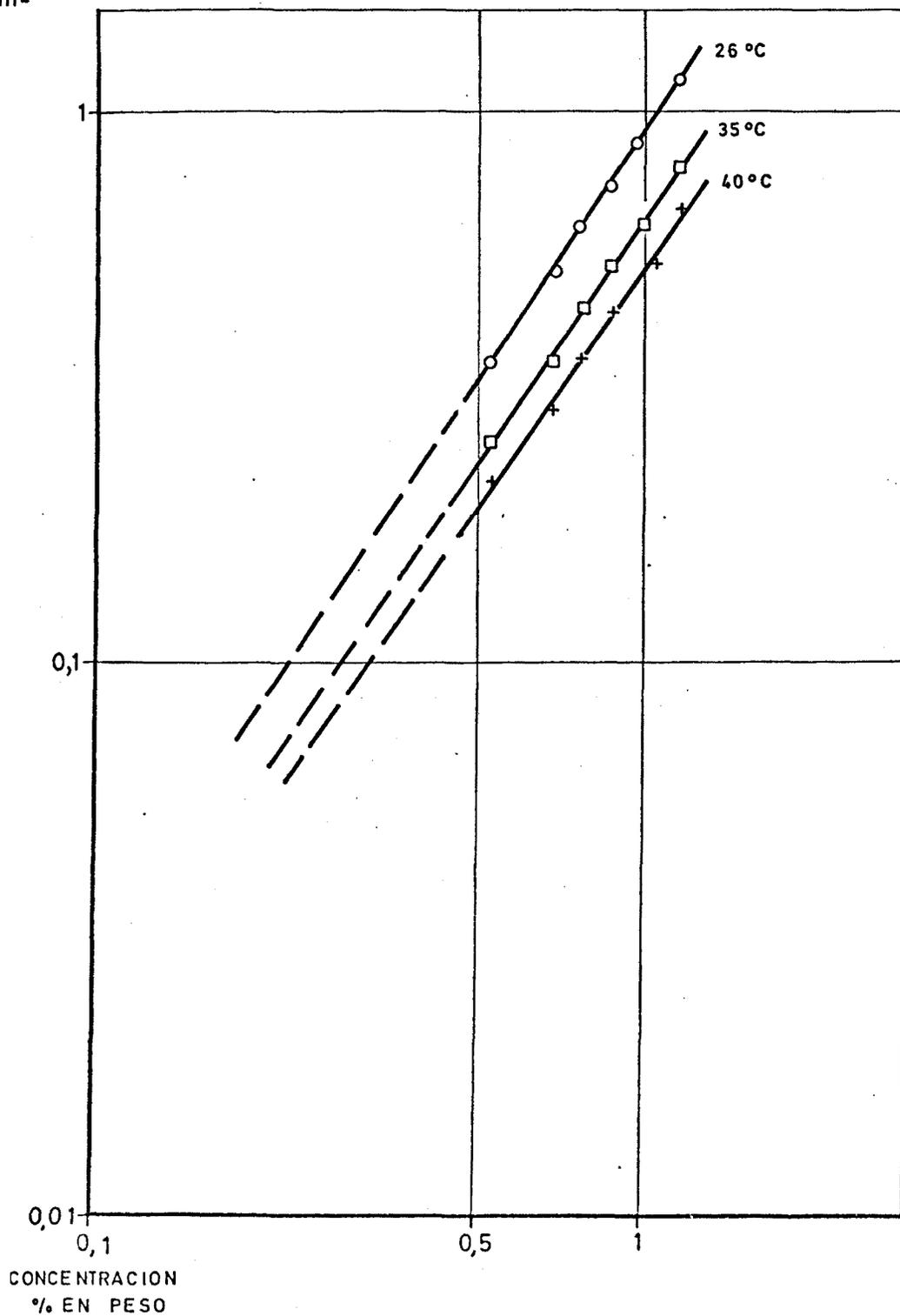
CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 — DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA. —

Fig. 3.19

VARIACION DE LA CONSISTENCIA K
 CON LA CONCENTRACION

LINEAS ISÓTERMAS

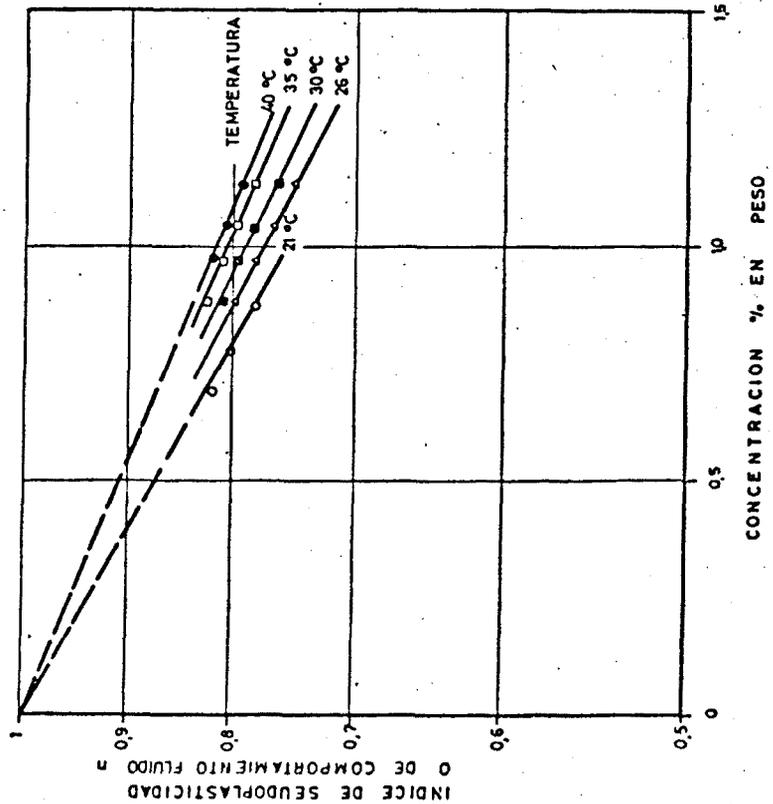
CONSISTENCIA K,
 $\frac{\text{dinas} \cdot \text{sn}}{\text{cm}^2}$



CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

Fig. 3.20

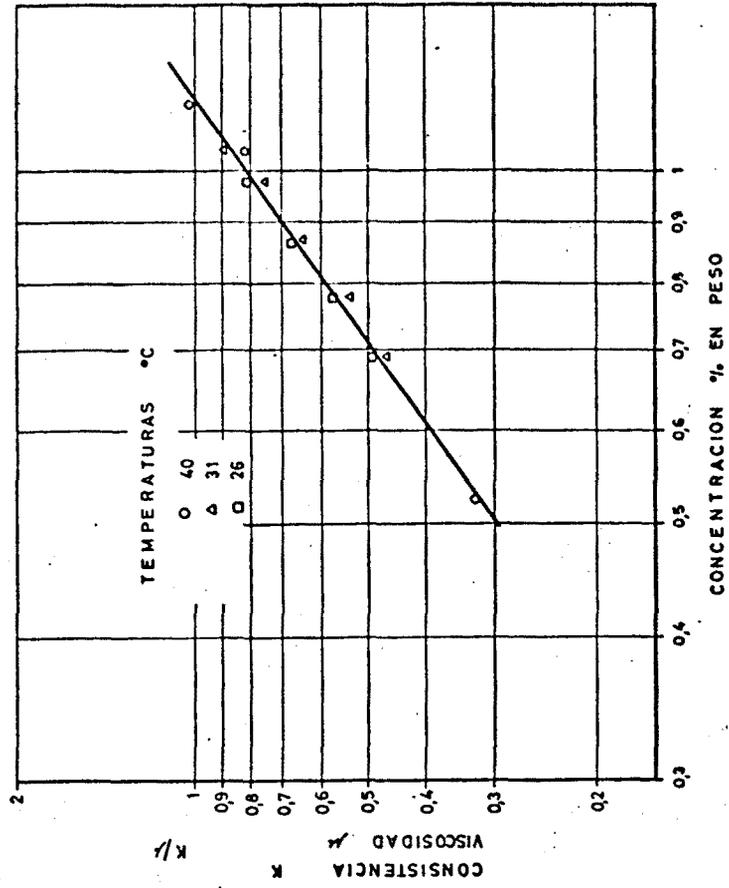
VARIACION DEL INDICE DE SEUDOPLASTICIDAD n
 CON LA TEMPERATURA Y CONCENTRACION
 LINEAS ISOTERMAS



CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

Fig. 3.21

CONSISTENCIA REFERIDA A LA VISCOSIDAD DEL
 SOLVENTE EN FUNCION DE LA CONCENTRACION



terminación de los parámetros adimensionales siguientes :

$\varphi / \left(\frac{du}{dy}\right)^n \cdot K$ parámetro indicador de la aproximación del modelo al comportamiento real.

$$\mu_0 / K \left(\frac{du}{dy}\right)^{n-1} = \frac{\mu_0}{\mu_{ap}} \quad \text{y} \quad \mu / K \left(\frac{du}{dy}\right)^{n-1} = \frac{\mu}{\mu_{ap}}$$

viscosidades relativas aparentes de la solución.

K_0 / K coeficiente de consistencia relativo (ARRHENIUS μ_0 / μ)

$\frac{du}{dy} \cdot t$ acción del tiempo y de la cizalladura en el envejecimiento.

n ó $(1-n)$ índice de pseudoplasticidad.

c concentración.

El parámetro $\varphi / (du/dy)^n K$ se empleó cuando la selección del modelo reológico en el capítulo I.

Transcurrido el tiempo de estabilización, K se hace igual a la viscosidad μ del solvente. Este valor puede tomarse como consistencia de referencia, K_0 , obteniéndose el parámetro K/μ ó μ/K . La figura 3.21 da, para varias temperaturas, la relación funcional :

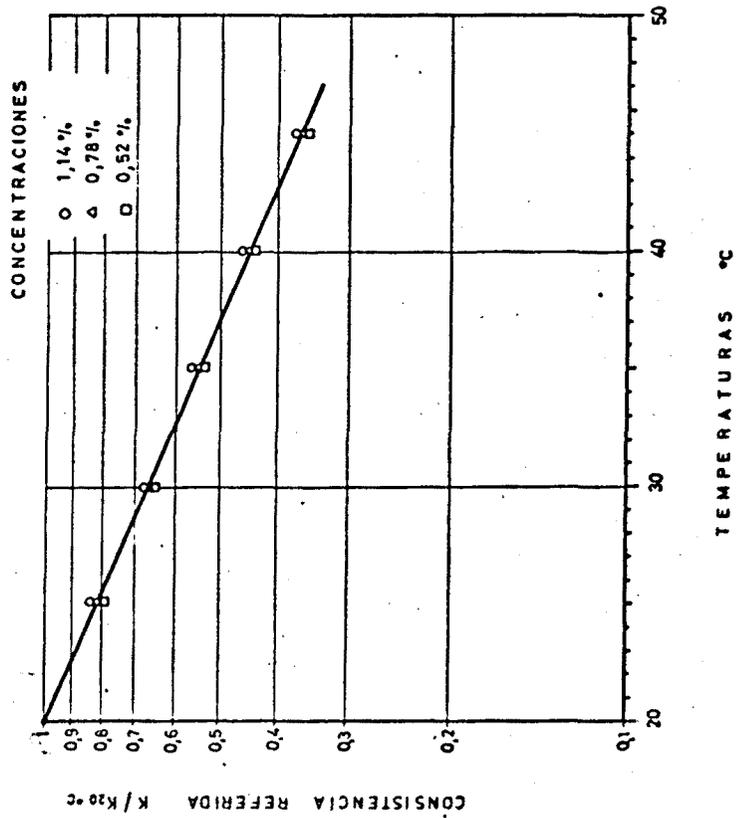
$$\frac{K}{\mu} = B(T) c^{\beta(T)} \quad \text{ó} \quad \lg \frac{K}{\mu} = \lg B(T) + \beta(T) \lg c$$

siendo $B(T)$ y $\beta(T)$, según los resultados, dos valores

CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCIONES CMC HERCULES 12M8F EN AGUA

Fig. 3.22

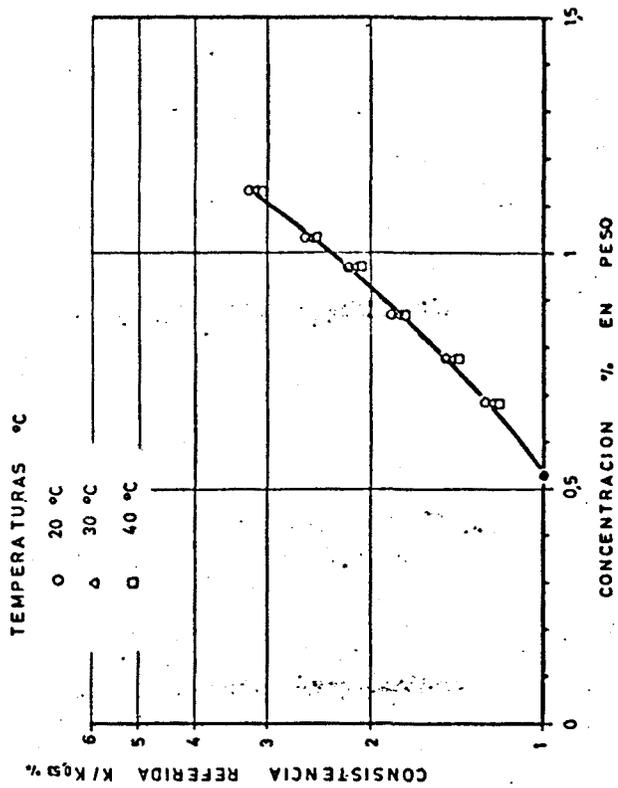
CONSISTENCIA REFERIDA A 20 °C
 EN FUNCION DE LA TEMPERATURA



CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

Fig. 3.23

CONSISTENCIA REFERIDA A 0,53%
 DE CONCENTRACION, EN FUNCION DE
 LA CONCENTRACION



constantes para cualquier temperatura y posiblemente función del polímero y de la concentración.

Las correlaciones entre las variaciones de K/μ y de n con la temperatura da un sistema con dos grados de libertad, que, por eliminación de la concentración, queda expresado por la ecuación de estado :

$$\lg \frac{K}{\mu} = \lg \left(\frac{B}{\alpha(T)} \cdot (1 - n) \right)$$

o también :

$$\lg \frac{K}{\mu} = A(T) \cdot (1-n)$$

La utilización del parámetro adimensional K/K_0 también es de interés por su fácil correlación con la temperatura, figura 3.22, en la que se observa una variación lineal de $\log K/K_{20^\circ\text{C}}$ con la temperatura, es decir, sigue el coeficiente una expresión del tipo (ARREHENIUS) :

$$\frac{K_T}{K_{T_0}} = \exp \left(\text{cte.} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

como era de esperar.

La representación de K_T/K_{T_0} respecto de $1/T$ daría la misma evolución que cualquier líquido newtoniano. La figura 3.23 toma como referencia la consistencia a concentración constante, siguiendo la expresión aproximada :

$$\lg \frac{K_c}{K_{c_0}} \approx B + \alpha c$$

Se ha indicado el interés del parámetro $(1-n_0)$. Si además se introduce el valor $(n-n_0)$, índice de variabilidad del valor de n dentro de la zona de estudio, es decir, de modificación con la temperatura o la concentración, y lo comparamos con el primero, se obtiene la variabilidad en la zona de estudio respecto al alejamiento del comportamiento newtoniano, representado por $n-n_0/1-n_0$.

En la figura 3.24; se da la variación de este nuevo índice, $(n-n_0)/(1-n_0)$, de referencia a concentración dada respecto del coeficiente de consistencia referido. La representación logarítmica de la figura 3.25 sigue la expresión :

$$\lg \frac{K}{K_c} = -B C_o^\beta \frac{n-n_c}{1-n_c} + \text{cte}$$

siendo C_o^β constante en casi todo el intervalo.

De igual manera, tomando como referencia la característica a cierta temperatura, en la figura 3.26, se representa la variación de $(n-n_T/1-n_T)$ respecto de $\log (K/K_T)$, siendo ésta del tipo :

$$\lg \frac{K}{K_T} = - \text{cte} \left(\frac{n-n_T}{1-n_T} \right) + \text{cte}$$

Según THIRRIOT (12) :

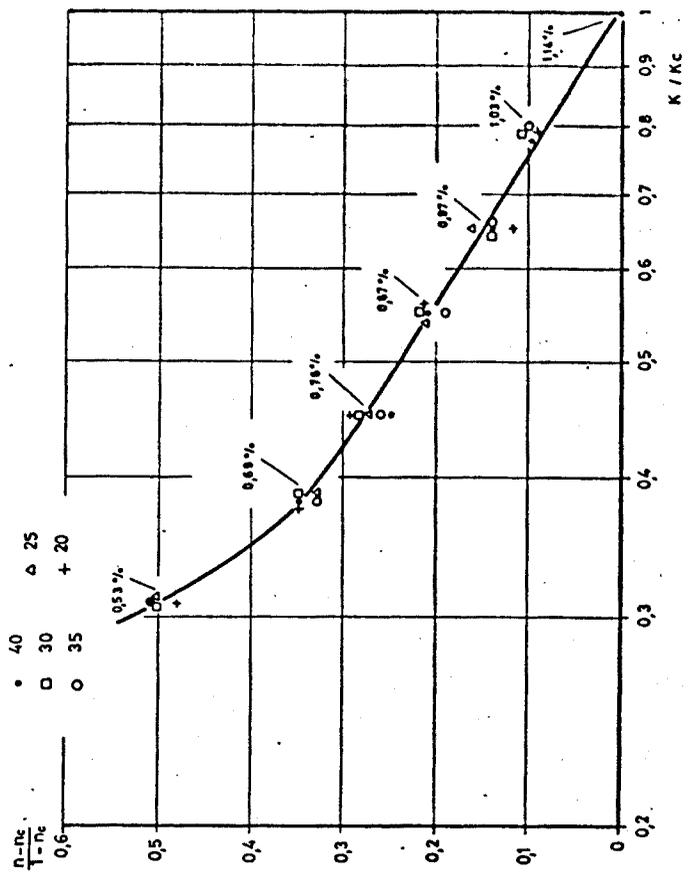
$$\lg \frac{K}{K_T} = - \frac{E}{R} \frac{1}{p^*} \left(\frac{n-n_T}{1-n_T} \right)$$

con $p^* = \frac{p}{\frac{p}{T_0} + q}$, parámetros introducidos anteriormente.

CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCIONES C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

Fig.3.25

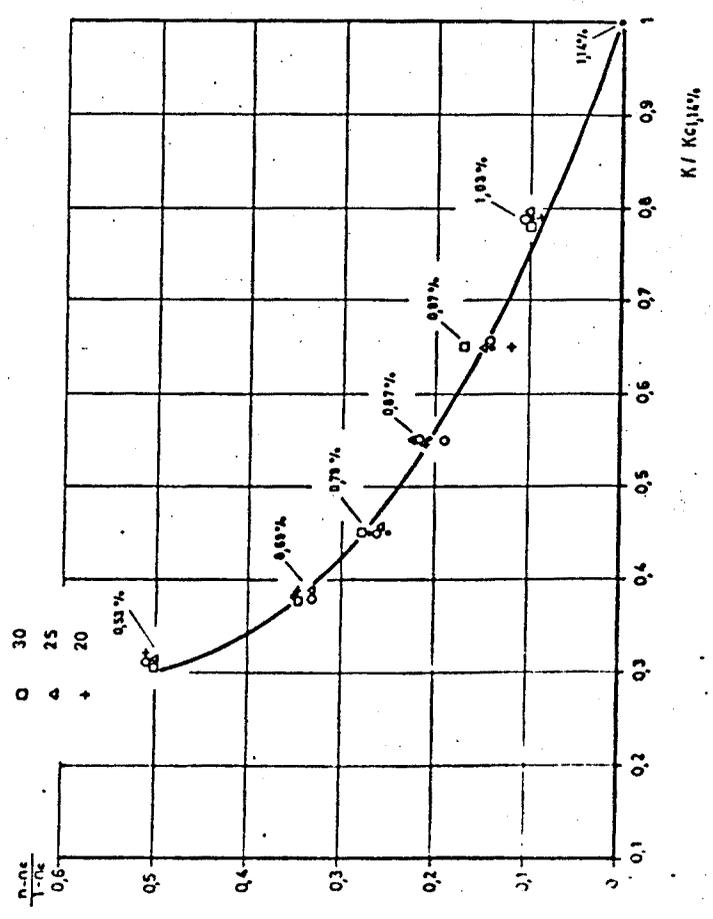
RELACION ENTRE LAS CARACTERISTICAS
 REOLOGICAS REDUCIDAS K/K_c Y $\frac{n-n_c}{1-n_c}$
 CONCENTRACION DE REFERENCIA 1,14%
 TEMPERATURAS °C



CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCIONES C.M.C HERCULES 12M8F EN AGUA

Fig.3.24

RELACION ENTRE LAS CARACTERISTICAS
 REOLOGICAS REDUCIDAS K/K_c Y $\frac{n-n_c}{1-n_c}$
 REFERENCIA CONCENTRACION 1,14%
 TEMPERATURAS °C



Todas estas expresiones, posibles situaciones de estado, se sintetizan en el gráfico 3.27 que, a su vez, es representado de forma analítica por ellas. En él se pueden seleccionar concentraciones y temperaturas para obtener un comportamiento pseudoplástico determinado.

Llegados a este punto, el fluido queda perfectamente caracterizado reológicamente y es ya posible estudiar la influencia de las variables temperatura y concentración en los gradientes de velocidad o en los esfuerzos cortantes que se puedan representar.

Así, partiendo de la ley de OSTWALD, el esfuerzo cortante varía con la temperatura para todas las otras condiciones fijadas según :

$$\tau = K_T \cdot \exp \left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \left(\frac{du}{dy} \right)^{n(T)}$$

donde $1-n = \left(\frac{P}{T} + q \right) \cdot c^\beta$

y se obtiene :

$$\tau = K_T \cdot \exp \left(\frac{-E}{R \cdot T_0} \right) \left(\frac{du}{dy} \right)^b \cdot \exp \left(\frac{E}{R \cdot T} \right) \left(\frac{du}{dy} \right)^{a/T}$$

De otra manera :

$$\log \tau = \log r + \frac{S}{T} = f \left(\frac{1}{T} \right)$$

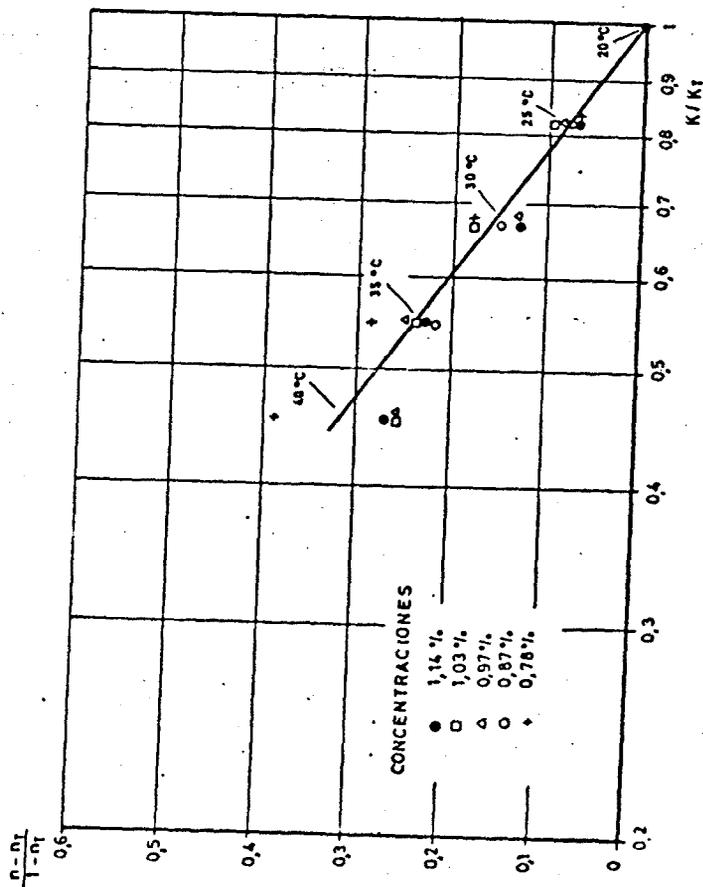
siendo r función de la concentración, expresión fácilmente manipulable a partir de representaciones gráficas como las de la figura 3.28.

CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

Fig. 3.26

RELACION ENTRE LAS CARACTERISTICAS
 REOLOGICAS REUNIDAS K/K_T Y $\frac{n-n_T}{1-n_T}$

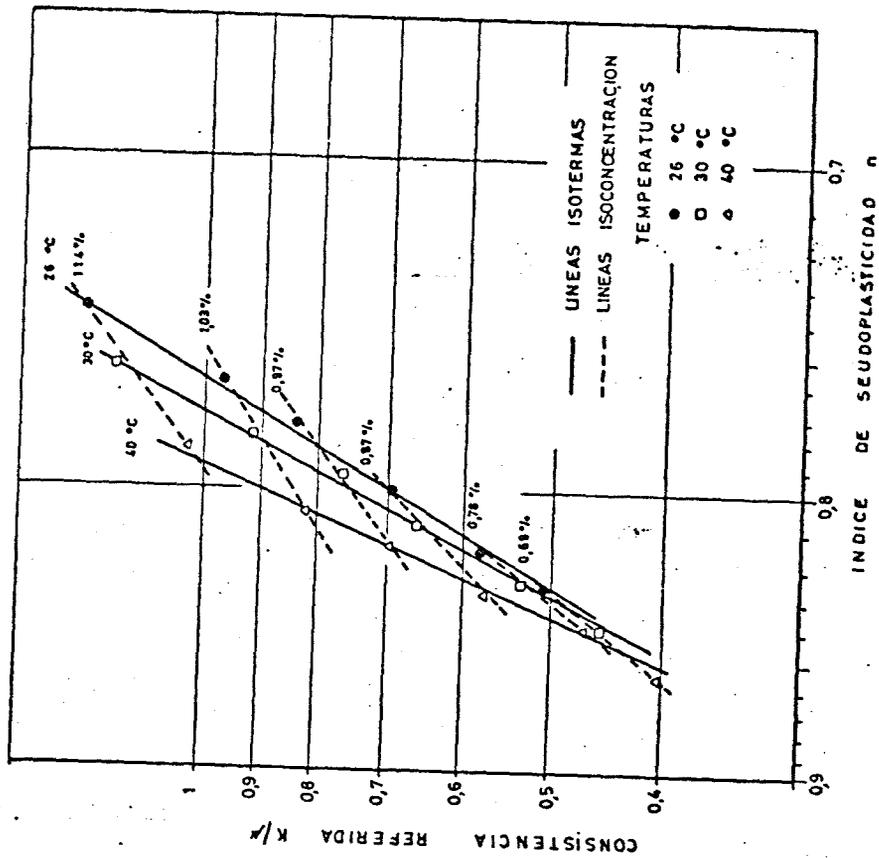
TEMPERATURA DE REFERENCIA 20 °C



CARACTERIZACION DEL FLUIDO SEUDOPLASTICO
 DISOLUCION C.M.C. HERCULES 12M8F EN AGUA

Fig. 3.27

RELACION ENTRE LA CARACTERISTICA
 REOLOGICA REFERIDA K/μ Y EL INDICE
 DE SEUDOPLASTICIDAD n



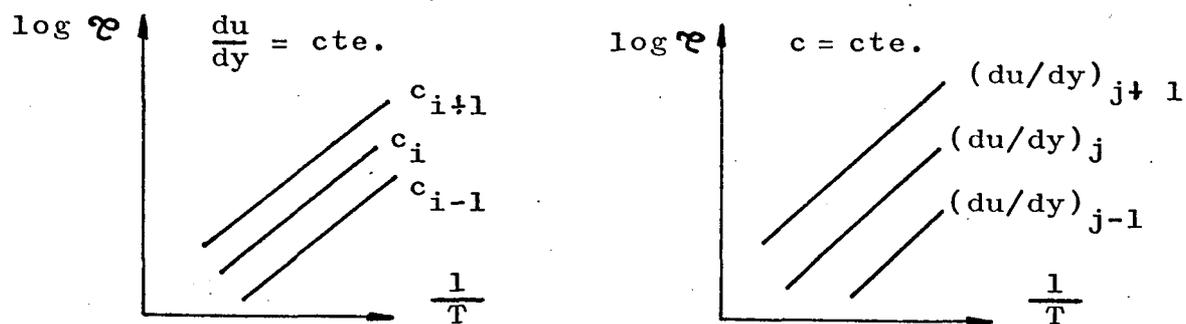


Figura 3.28

3.4.4. - CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado una sistemática de caracterización de los fluidos reológicos de carácter seudoplástico que permite la selección de un comportamiento, a partir de las variables independientes, y el trabajar con los valores del esfuerzo cortante directamente, partiendo de las variables correspondientes.

El método lo consideramos de gran interés, por ser frecuente en la ingeniería y por permitir una sistemática en el estudio de un fluido de este tipo, en la presentación de resultados y posterior explotación de éstos.

Los resultados experimentales han puesto de manifiesto las variaciones de K y n , parámetros reológicos, con la temperatura, concentración y tiempo. Estas variaciones están de acuerdo con el concepto de viscosidad que se desprende de la teoría cinética de los líquidos (teoría de EYRING), con las dimensiones de los parámetros empleados (K , μ) y con la literatura consultada, en la que se plasman los resultados experimentales sobre fluidos no newtonianos a base de CMC o de otra composición, que concuerda con el comportamiento observado salvo en los casos que se han indicado y haciendo notar que, en este estudio, se ha trabajado a concentraciones mas bajas que las utilizadas por otros autores.

NOMENCLATURA

CORRESPONDIENTE AL CAPITULO I y ANEJO I-A

$\mu_{ap}, \mu_{dif}, \mu, \mu_o, \mu_r$ μ_{esp}, μ_p, μ_T	Viscosidad aparente, diferencial, de la solución, del solvente, relativa, específica, límite a T dada.
τ	Esfuerzo cortante.
K, K_o, K_{T_o}, K_T	Coefficiente de consistencia, de referencia, a T_o , a T.
n, n_o, n_T	Indice de pseudoplasticidad, de referencia a T.
du/dy	Gradiente de velocidades.
c, c_o	Concentración, de referencia.
E, E_D, E_{∞}	Entropía de activación, a gradiente de velocidades constante, a esfuerzo cortante constante.
R	Constante de los gases.
T, T_o	Temperatura de referencia.
$\alpha, \alpha(T), \beta,$ $\beta_o, \beta(T), \gamma$	Angulo, funciones características de origen experimental, constantes.
$A, B, B(T), a, b,$ a', b', p, q, p^*	Cortantes experimentales, funciones.
ρ	Densidad.
S	Entropía.
t	Tiempo.

BIBLIOGRAFIA - CAPITULO III

1. - PATTON. Paint Flow and Pigment. Dispersión. Interscience.
2. - SHERMA. Emulsión Science. Academic Press.
3. - FRISH, SIHMA. The Viscosity of Colloid Suspensions and Macromolecular Solutions 525-612 pp. RHEOLOGY - tomo 1.
4. - BONDI. Theories of viscosity 321-350 pp. RHEOLOGY tomo 1.
5. - FOX, GRATCH, LOSHAEK. Viscosity Relationships for - Polymers in Bulk and in Concentrated Solution. 431-492 pp. RHEOLOGY tomo 1.
6. - REE, EYRING. The relaxation theory of transport phenomena. 83-142 pp. RHEOLOGY tomo 2.
7. - ATKINSON. The rheology of Cellulose derivatives 233-259 pp. RHEOLOGY tomo 2.
8. - BONDI. Viscosity and Molecular Structure 1-82 pp. RHEOLOGY tomo 4.
9. - NEDONCHELLE. Thèse - Comportement de l'empois de l'almidon - Strasbourg 1.968.
- 10.- BELLET, THIRRIOT. Mesure des divers paramètres - rhéologiques. Société Hydrotechnique de France - Mars 1.970.

- 11.- BELLET, SANGELIN. Quelques experiencies sur le comportement non-newtonien des liquides organiques. Societé Hydrotechnique de France - 1.972.
12. - THIRRIOT, BELLET. Recherche de lois de composition en Rhéologie des liquides organiques. VI Congrès - International de Rheologie- Lyon-1.972.
- 13.- BELLET. Relation entre comportements rhéologiques - pseudoplastiques et echange thermique. Thèse - Toulouse 1.973.
- 14.- FITO, ESCARDINO, MOLINA. Determinación de las propiedades reológicas de los alimentos. Comportamiento - de las soluciones acuosas de algunos espesantes. Re vista Agroquímica y tecnología de los alimentos.
- 15.- Seminario sobre problemática industrial e investigaga dora de los fluidos no newtonianos. Curso no publicado de la U.P.B.

C A P I T U L O I V

FLUJO EN MEDIOS POROSOS

Sine experientia, nihil sufficienter sciri potest

Roger Bacon (1214-1292)

Opus Maius, II, 169

C A P I T U L O I V

FLUJO EN MEDIOS POROSOS.

4.1. - ECUACIONES FUNDAMENTALES DEL MOVIMIENTO DE UN FLUIDO. LEY DE DARCY

Las ecuaciones que rigen el movimiento de un fluido en cualquier escala y a través de cualquier medio son la ecuación de continuidad :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \vec{\nabla} \rho \vec{v}$$

y la ecuación del movimiento o de NAVIER-STOKES :

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = - \vec{\nabla} p - \vec{\nabla} \vec{\tau} + \rho \vec{F}$$

Normalmente $\vec{\nabla} \vec{\tau} = (\lambda + \mu) \vec{\nabla} \theta + \mu \Delta \vec{v}$, siendo λ y μ los coeficientes de LAME y $\theta = \vec{\nabla} \cdot \vec{v}$

A estas ecuaciones hay que añadir la relación entre esfuerzos viscosos y gradientes de velocidad (Hipótesis de STOKES) o función reológica :

$$\tau^* = \tau \left(\frac{dv}{dy} \right)$$

y la ecuación de estado del fluido : $\mathcal{F}(\rho, p, T) = 0$

Y, finalmente, se precisa para la resolución del sistema las condiciones de contorno o iniciales.

La ecuación del movimiento suele presentar - no linealidad en sus coeficientes, en especial :

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v_x \frac{\partial v}{\partial x} + v_y \frac{\partial v}{\partial y} + v_z \frac{\partial v}{\partial z}$$

y tanto ésta como la ecuación de la continuidad tienen - una difícil resolución según las condiciones límites que correspondan, dado que el límite físico, en este caso el medio poroso, no es de fácil representación matemática.

Si el planteamiento de ambas ecuaciones se - realiza a partir de los valores macroscópicos de las variables que intervienen en el movimiento, el problema se simplifica al introducir las condiciones límites, ya que éstas pasan a ser las de la periferia del conjunto en estudio, contorno del medio poroso. Con este planteamiento, podremos realizar medidas experimentales de las variables que intervienen en el derrame y de las características - globales del medio poroso (19,22,34,37).

Diversos autores han empleado valores macroscopícos de magnitudes, como valores medios sobre superfiecies, sobre volúmenes, ponderación de valores microscopícos, etc., llegándose a un planteamiento como el que sigue.

A un punto del medio poroso se le asocia un volumen V limitado por la superficie S que lo cierra. - Siendo en él, V_f el volumen del fluido con una superfi-

cie de contacto que lo limita S_f , ésta se descompone a su vez en interfase sólido-fluido e interfase con la superficie no sólida-fluido, $S_f = S_{fs} + S_{ff}$.

El medio poroso rígido se caracteriza por la función $\alpha(x)$,

$\alpha(x) = 1$ situado en el fluido.

$\alpha(x) = 0$ situado en el sólido.

La ley espacial de la función $\alpha(x)$, toda o nada, reúne todo lo que es posible y útil conocer sobre el medio poroso a escala granulométrica. Toda propiedad macroscópica del medio poroso puede expresarse con la ayuda de funciones que hagan intervenir el valor que tome $\alpha(x)$ en el interior de un volumen suficientemente grande ; así (25) la porosidad media se expresa :

$$m = \frac{1}{V} \int_V \alpha(x) dV$$

Según esto, la ecuación de continuidad se expresa :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_f} \rho dV + \int_{S_{ff}} \rho \vec{v} ds = 0 \quad (I)$$

puesto que por el esqueleto sólido, S_{fs} , no puede pasar fluido.

La ecuación de Naviers-Stokes, o del movimiento, se expresa :

$$\int_{V_f} \rho \frac{Dv}{Dt} dV = - \int_{S_{ff}} p \vec{ds} - \int_{S_{ff}} \vec{\tau} ds - \int_{S_{fs}} (\vec{\tau} + p\vec{I}) ds + \int_{V_f} \rho \vec{F} dV$$

y también :

$$\int_V \alpha(x) \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} dV = - \int_S \alpha(x) p d\vec{S} - \int_{Sf} \alpha(x) \vec{\bar{e}}^* d\vec{S} -$$

$$- \int_{Sfs} (\vec{\bar{e}}^* + p\vec{I}) d\vec{S} + \int_V \alpha(x) \rho \vec{F} \quad (II)$$

teniendo el segundo miembro las fuerzas de presión, las fuerzas viscosas en el fluido y las fuerzas exteriores, todo referido al volumen V.

Las medidas locales de las variables características del fluido y derrame se definen como :

densidad :

$$\rho_m = \frac{1}{V} \int_V \alpha(x) \rho dV \quad ; \quad \rho = \rho(x)$$

velocidad de filtración :

$$\vec{\nabla}(\rho \vec{q}) = \frac{1}{V} \int_S \rho \alpha(x) \vec{v} d\vec{S} = \frac{1}{V} \int_V \vec{\nabla}(\rho \alpha(x) \vec{v}) dV \quad ;$$

$$\vec{q} = \vec{q}(x)$$

presión media del fluido :

$$\vec{\nabla}(mp) = \frac{1}{V} \int_S \alpha(x) p d\vec{S} \quad ; \quad p = p(x)$$

tensor de esfuerzos viscosos :

$$\vec{\nabla}(m \vec{\bar{e}}) = \frac{1}{V} \int_S \alpha(x) \vec{\bar{e}}^* d\vec{S} \quad ; \quad \vec{\bar{e}}^* = \vec{\bar{e}}^*(x)$$

Sustituyendo estas magnitudes en las ecuaciones de continuidad y del movimiento, se obtiene :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \vec{\nabla} (\rho \vec{q}) = 0$$

$$\frac{1}{V} \int_V \alpha(x) \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} dV = -\vec{\nabla} (mp) - \vec{\nabla} (m \bar{\bar{\mathcal{E}}}) - \frac{1}{V} \int_{Sfs} (\bar{\bar{\mathcal{E}}} + p\bar{\bar{I}}) d\vec{S} + m \rho \vec{F}$$

El término de inercia de la ecuación del movimiento puede expresarse en función de \vec{q} , velocidad de filtración o superficial, suponiendo que la porosidad de volumen coincide con la de superficie (3) :

$$\frac{1}{V} \int_V \alpha(x) \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} dV = \rho \left[\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \vec{q} \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{q}}{m} \right) \right]$$

y despreciando términos de menor orden.

La hipótesis de que el tensor de esfuerzos viscosos medio $\bar{\bar{\mathcal{E}}}$ es función de la parte simétrica del tensor gradientes de velocidad de filtración (análogamente a como se hace con $\bar{\bar{\mathcal{E}}}^*$ para un fluido de STOKES), para una porosidad constante y un derrame uniforme y permanente, da :

$$\int_V \alpha(x) \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} dV = 0 \quad \text{y} \quad \vec{\nabla} (m \bar{\bar{\mathcal{E}}}) = 0$$

luego, la ecuación del movimiento se expresa :

$$-\left[\vec{\nabla} p - \rho \vec{F} \right] = \bar{A} \quad \text{(III)}$$

con :

$$\vec{A} = \frac{1}{mV} \int_{Sfs} (\vec{\bar{r}} + p\vec{\bar{I}}) d\vec{S}$$

como fuerzas del sólido sobre el fluido por unidad de volumen de fluido.

En el caso de un medio poroso uniforme, de porosidad constante, en el interior de un cilindro en el cual el derrame es uniforme, permanente, incompresible, unidimensional (macroscópicamente), suficientemente lento encontramos que las fuerzas de inercia en el fluido son despreciables con relación a los otros términos, siendo la expresión anterior (III) la ley de DARCY generalizada.

Si se hacen las hipótesis sobre las fuerzas

A :

1) - Son función de la velocidad de filtración :

$$\vec{A}(x) = \varphi[\vec{q}(x)]$$

2) - $\varphi(0) = 0$

3) - φ tiene derivada en el origen, siendo de la forma

$$\varphi(\vec{q}) = \left(\frac{\vec{\bar{I}}}{k}\right) \vec{q} + r(\vec{q}) \cdot \|\vec{q}\| \text{ con } \lim_{\|\vec{q}\| \rightarrow 0} r(\vec{q}) = 0$$

donde $\left(\frac{\vec{\bar{I}}}{k}\right)$ es el tensor inverso del tensor permeabilidad o tensor resistividad. Si el medio es isótropo, $\vec{\bar{k}} = k_0 \cdot \vec{\bar{I}}$ con k_0 independiente de \vec{q} .

Y, luego de las experiencias sobre un permeámetro, obtuvo la expresión :

$$\frac{Q}{S} = - \frac{k_o}{\mu} \left(\frac{dp}{dz} - \rho g_o \right)$$

La ecuación expresada en forma discreta es :

$$\frac{Q}{S} = - \frac{k_o}{\mu} \left(\frac{P_1 - P_o}{l} - \rho g \cos \theta \right)$$

Se define k_o precisamente a partir de esta ecuación y siendo una propiedad del medio poroso, cuyas dimensiones son : $(LJ^2 \cdot (M) \cdot (T)^{-2})^*$

También se suele definir la permeabilidad relativa a partir de :

$$\frac{Q}{S} = - k \left(\frac{P_1 - P_o}{l \gamma} - \cos \theta \right)$$

siendo entonces $k_o = k \cdot \mu / \gamma$, k función del fluido y del medio poroso. Si Q/S se asimila a la velocidad de filtración según la dirección del derrame :

$$\bar{q} = - \frac{k_o}{\mu} \left(\frac{dp}{dz} - \rho g \right) \quad (IV)$$

Y, comparándola con la ley de DARCY generalizada, (III) :

$$- (\bar{\nabla} p - \rho \bar{F}) = \bar{A}$$

Con (IV) se obtiene $A = \bar{q} \mu / k_o$, con lo que la ecuación -

NOTA.- Las unidades k_o son m^2 y micrón cuadrado ($10^{-12} m^2$). También el DARCY, semejante al micrón cuadrado.

del movimiento coincide con la clásica de DARCY :

$$\bar{q} = - \frac{k_o}{\mu} (\vec{\nabla} p - \rho g)$$

con el concepto de presión motriz : $p^* = p + \rho gh$

y con el de gradiente hidráulico : $i = \frac{1}{\rho g} \vec{\nabla} p^*$

siendo h la distancia vertical en dirección opuesta a la gravedad, la ley de DARCY se expresa :

$$\bar{q} = - \frac{k_o}{\mu} \rho g i$$

4.1.1. - LIMITES DE APLICACION DE LA LEY DE DARCY Y EFECTOS INERCIALES

Cuando la velocidad de filtración crece, los efectos de inercia toman importancia, no cumpliéndose las hipótesis enunciadas. Este fenómeno se manifiesta a velocidades tanto menores cuanto mayor sea el tamaño de los canaliculos del medio poroso y menor la viscosidad del fluido.

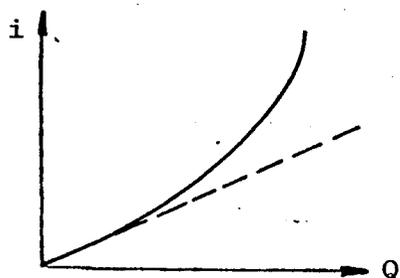


Figura 4.2.

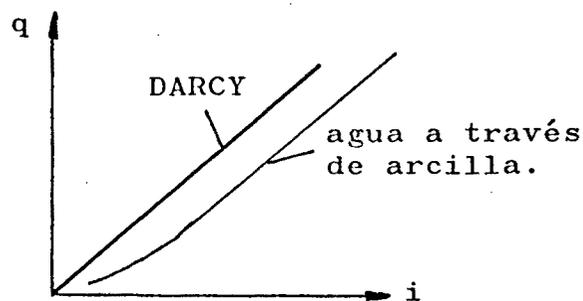


Figura 4.3.

Así ocurre que, al incrementar el gradiente hidráulico, se produce una evolución de caudal que deja, en cierto momento, de ser lineal (fig. 4.2.). Este fenómeno se presenta para valores del número de REYNOLDS entre 1 y 10, siendo $Re = d_{10} \cdot \bar{q} / \nu$.

Los efectos de turbulencia empiezan a manifestarse a partir de valores de Re del orden de 60 (39), no siendo función de la forma de los granos.

4.1.2. - EFFECTOS MOLECULARES

La ley de DARCY está limitada superiormente en su aplicación por los fenómenos de inercia. Se presenta un límite inferior en poros de diámetro muy reducido y para velocidades muy bajas, por efectos moleculares.

En estos poros, el recorrido libre medio de las moléculas es del orden de magnitud de la dimensión del poro. Las colisiones con las paredes son significativas y comparables a las de las moléculas entre sí, el modelo continuo sobre el que trabaja la Mecánica de Fluidos ya no es aplicable.

En los líquidos, este fenómeno no se puede observar experimentalmente, por el valor excesivamente bajo que precisa la velocidad. Sí es observable, por con

tra, en los gases a través de medios porosos (18,27) y - tubos capilares (2,29,31).

Así tenemos la expresión de KLINKENMERG, en que aparece la permeabilidad del gas.

$$k_g = k_o \left(1 + \frac{b}{p_m} \right)$$

k_o permeabilidad del campo de aplicación de DARCY para - líquidos, b función del fluido y gas (20), p_m presión me- dia del flujo, siendo la ecuación del movimiento :

$$\vec{A} = \frac{\mu}{k_o \left(1 + \frac{b}{p_m} \right)} \vec{q}$$

Esta expresión no es válida para presiones medias muy ba- jas (del orden de 6000 dinas/cm² (18)).

Para tubos capilares con efectos moleculares y para medios porosos análogos, se aplica (KNUDSEN) :

$$Q_m = - \frac{cd_{10}}{\sqrt{RT}} \frac{dp}{dz}$$

Para derrames intermedios entre el de efectos moleculares y el de DARCY (ARNELL) :

$$Q_m = - \left(\frac{d^2}{a\mu RT} p + \frac{cd}{\sqrt{RT}} \right) \frac{dp}{dz}$$

a constante sin dimensiones. El primer término represen- ta el derrame viscoso; el segundo, el molecular. Se obser- va como interviene la presión p en la ponderación de am- bos.

4.1.3. - OTROS EFECTOS

Cualquier otro incumplimiento de las hipótesis establecidas para la ley de DARCY da desviaciones de ésta. Fenómenos tales como electro-ósmosis, termo-ósmosis, anisotropía y heterogeneidad en el medio poroso o el fluido, campos exteriores no gravitatorios, etc. pueden ocasionar estas desviaciones.

Un ejemplo de este posible efecto es el comportamiento del agua en las arcillas. Ha sido estudiado por diversos autores (15). Según parece, los fenómenos de origen electroosmótico y posible estructura cristalina del agua absorbida dan al fluido una característica de comportamiento (binghamiano) (fig. 4.3.). La expresión de SWARTZENDRUBER representa bien este comportamiento :

$$A_z = \left[\alpha qz + \beta (1 - e^{-\gamma qz}) \right]$$

A_z componente de las fuerzas del sólido sobre el fluido según la dirección del derrame, α , β y γ constantes experimentales. También :

$$\bar{A} = \alpha \left[1 + \frac{\beta}{\bar{q}} (1 - e^{-r\bar{q}}) \right] \bar{q}$$

que representa el comportamiento de soluciones de polímeros para medios porosos de baja permeabilidad.

4.1.4. - DERRAME DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO

Los primeros trabajos realizados se concentran en estudios de analogía (2,8,11,13,14,23,24,26,30,33,34,36) sobre tubos capilares, siendo los mejores resultados los de asimilación a fluido de Stokes del fluido - de OSTWALD - de WAELLE-NUTTING con una función reológica:

$$\tau_{\theta} = - \left[K \left| \sqrt{\frac{1}{2} (D:D)} \right|^{n-1} \right] \dot{D}$$

K y n son constantes del fluido y D la parte simétrica del tensor gradiente de velocidades. De otro modo :

$$\tau = - K \left(\frac{dv_x}{dz} \right)^n$$

Para una expresión de OSTWALD se obtiene :

$$q^n = - \frac{K_0}{\Psi} \left(\frac{dp}{dz} - \rho g \right)$$

con :

$$\Psi = \frac{K}{12} \left[3 \left(\frac{3n+1}{n} \right) \right]^n (72 \cdot t' \cdot k_0 m)^{\frac{1-n}{2}}$$

de donde :

$$A = \frac{K}{12} \left[3 \left(\frac{3n+1}{n} \right) \right]^n (72 \cdot t' \cdot k_0 m)^{\frac{1-n}{2}} \frac{\|q\|^{n-1}}{k_0} \cdot q$$

NOTA.- $\frac{1}{2} (D:D) = 2 \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right]$

$$+ \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_{\theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right]^2 +$$

$$+ \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_{\theta}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2$$

Tanto esta representación de OSTWALD, como la de STOKES, como las propuestas por otros autores, sólo dan el comportamiento fluido en el dominio de esfuerzos cortantes.

4.1.5. - DERRAME PARA CAUDALES ELEVADOS

Si la velocidad de filtración q_z aumenta, la ecuación de DARCY deja de representar el fenómeno (fig. 4.4.).

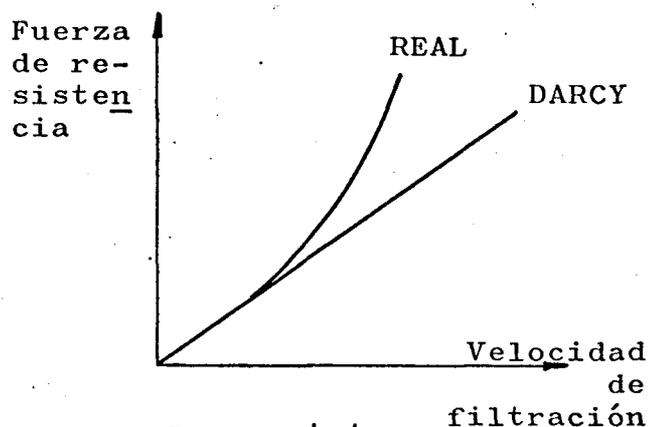


Figura 4.4.

Esta falta de linealidad se debe, parece ser, a efectos de inercia y, para caudales mayores, a la turbulencia (5,6,10,12,13,14,31,32,38).

FORCHEIMER propone la relación experimental :

$$A_z = a_{qz} + bq_z^2$$

a y b constantes dependientes del medio poroso y del fluido, cumpliéndose para caudales bajos $a = \mu/k_0$

Los estudios de analogía capilar y arrastre sobre esferas en medio fluido dan :

$$b = \phi \left(\frac{1 - m}{m} \right)^{0,5} \frac{p}{\sqrt{k_o}}$$

ϕ función de la geometría. MASSARANI da :

$$A_z = \left[\frac{\mu}{k_o} + \phi \left(\frac{1 - m}{m} \right)^{0,5} \frac{\rho}{\sqrt{k_o}} \bar{q} \right] \bar{q}$$

expresiones confirmadas experimentalmente.

4.1.6. - DISTRIBUCION DE PRESIONES Y DE VELOCIDADES EN EL DERRAME A TRAVES DE UN MEDIO POROSO

Las ecuaciones de continuidad, del movimiento y la del estado de un fluido dan, para ciertas condiciones de contorno, la distribución de presiones y velocidades $p = p(x)$ y $\bar{q} = \bar{q}(x)$.

Este sistema de ecuaciones diferenciales, en su forma más general, es dificultoso de resolver. En el caso de flujo lento; incompresible, fluido newtoniano en régimen permanente, medio poroso isótropo y homogéneo, - el sistema se reduce a :

$$\nabla \bar{q} = 0 \quad ; \quad \bar{q} = - \frac{k_o}{\mu} \nabla \left[(p + \rho gh) \right]$$

del cual se deduce la ecuación de Laplace :

$$\nabla^2 (p + \rho gh) = 0$$

de la que se obtiene el campo de presiones y, conocido éste, de la ecuación de la continuidad, el campo de velocidades. Las soluciones han sido estudiadas por diversos autores (1,12,16,17,28).

4.2. - MODELO INDUSTRIAL. MEDIO POROSO

En el apartado anterior se ha expuesto la teoría del derrame de un fluido a través de un medio poroso. De todas las hipótesis enunciadas, unas afectan al fluido, otras al fenómeno en su conjunto y otras al medio poroso. Sobre esto se supone su homogeneidad, isotropía, estabilidad física y química y, englobada en esta última, la permanencia de sus características geométricas en el tiempo o consolidación.

Dada la importancia de estas propiedades, pues ellas condicionan el derrame, se ha puesto especial interés en conseguir un medio poroso reproducible y simple que cumpla las hipótesis enunciadas en apartado 4.1.

La materialización de este lecho poroso, y su caracterización, geométrica o hidrodinámica, ha ocupado buena parte de este trabajo de investigación y a continuación se describen.

4.2.1. - MATERIALES

El medio poroso está constituido por esferas de termoplástico STYROPOR P, a base de poliestireno, amasadas con pegamento ARALDITE en una proporción del 2,5% en peso.

La selección del STYROPOR como constituyente del medio poroso se realizó ante la imposibilidad de encontrar vidrio u otro material calibrado de tamaño apropiado.

Antes de aceptarse como constituyente, se sometieron las esferas a pruebas de aplastamiento y estabilidad física (calor y acciones mecánicas) y químicas (estabilidad frente al agua, alcohol, glicerina, disoluciones de C.M.C., tetracloruro de carbono). Posteriormente, se realizaron pequeñas muestras de medio poroso, que fueron sometidas a las mismas pruebas en régimen estático - por inmersión y acción mecánica relativamente violenta - (golpes, rodadura). Finalmente, se construyó un pequeño filtro, para ser sometido a pruebas dinámicas a diversas temperaturas y caudales con los fluidos citados (fig. 4. 5.)

En todo momento, tanto el STYROPOR como en el medio poroso consolidado, se han observado buenas características de estabilidad en el tiempo a estas acciones.

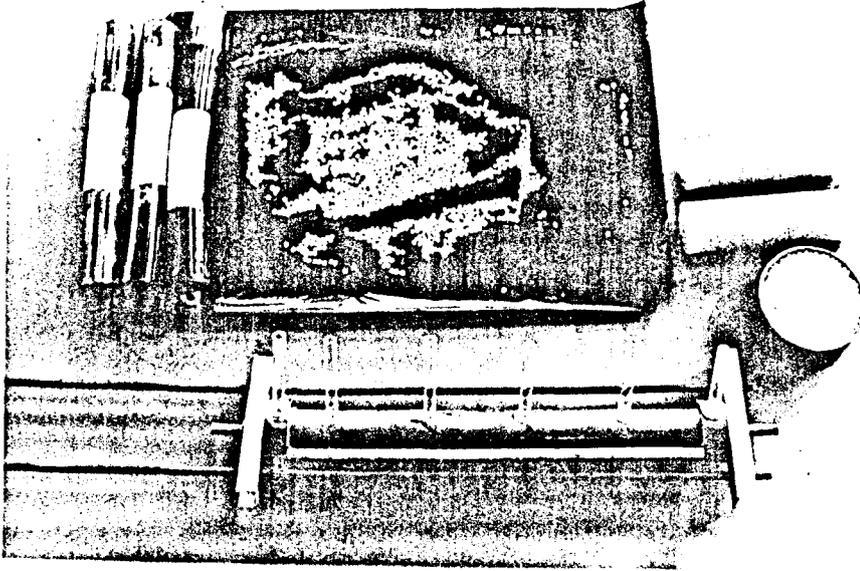


Figura 4.5.

En la figura 4.4. aparecen las muestras para ensayos de inmersión, las esferas consolidadas y no consolidadas, las muestras para ensayos mecánicos y el filtro prototipo.

Los datos característicos fundamentales del material STYROPOR son : coeficiente de dilatación de 8 a $10 \cdot 10^{-5}$ $^{\circ}\text{C}.$, humedad retenida 1%, densidad de 1,0 a 1,1, estabilidad del agente expansionante perfecta hasta 60 $^{\circ}\text{C}.$ (desaparece el agente a los cinco meses de almacenamiento)

La granulometría empleada es esférica, coeficiente de uniformidad $\lambda = 1$, (fig. 4.6.), seleccionada por tamizado y caracterizada por la curva granulométrica de la fig. 4.7. y el histograma granulométrico de la fig. 4.8., en las cuales se observa su gran homometría.

— CARACTERIZACION DEL MEDIO POROSO —

CURVA GRANULOMETRICA

Fig. 4.7

PROBABILIDAD DIAMETRO

50 % 2,475 m/m

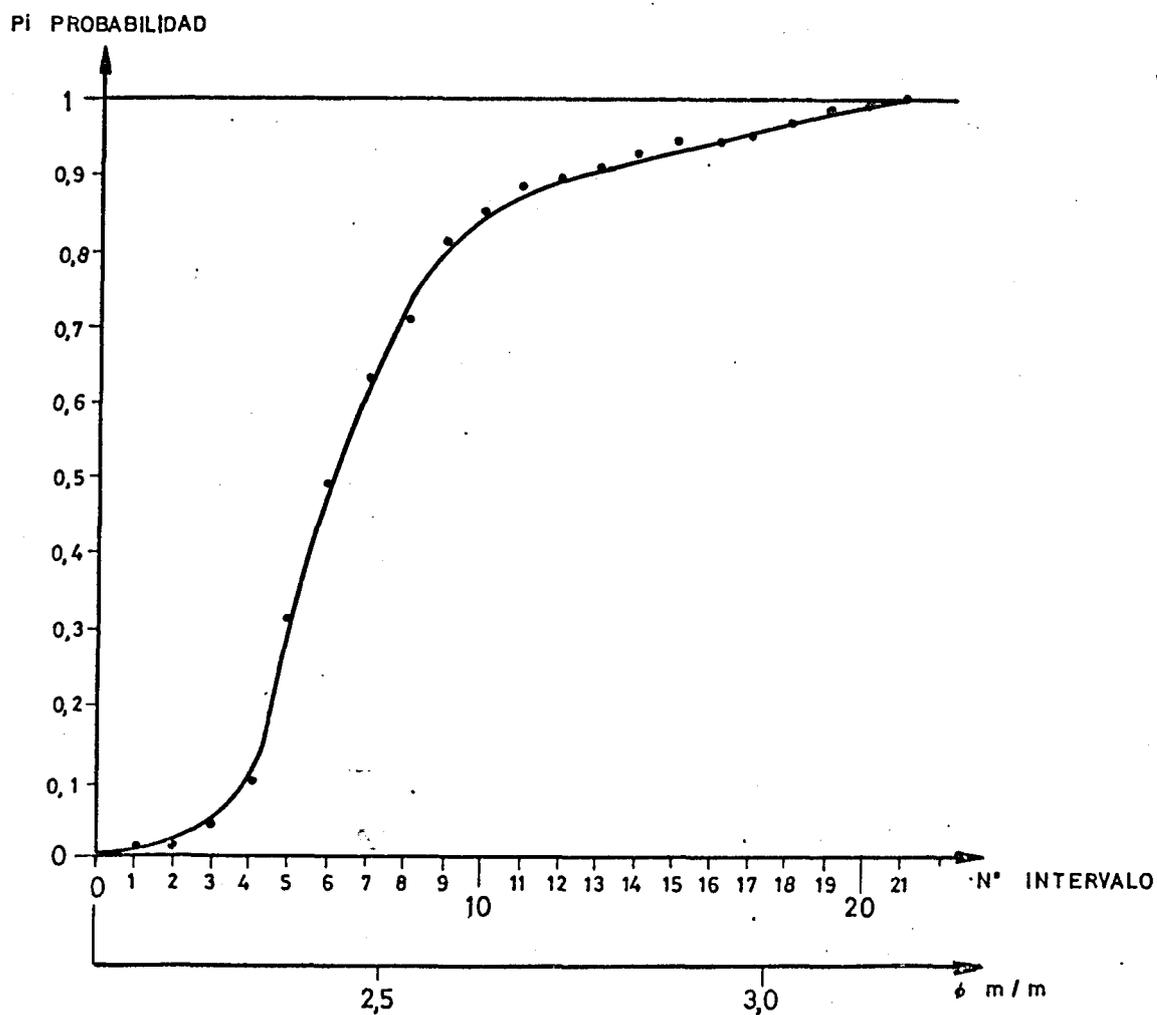
10 % 2,325 m/m

70 % 2,55 m/m

$$\text{COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD} = \frac{D_{10\%}}{D_{50\%}} = 0,94$$

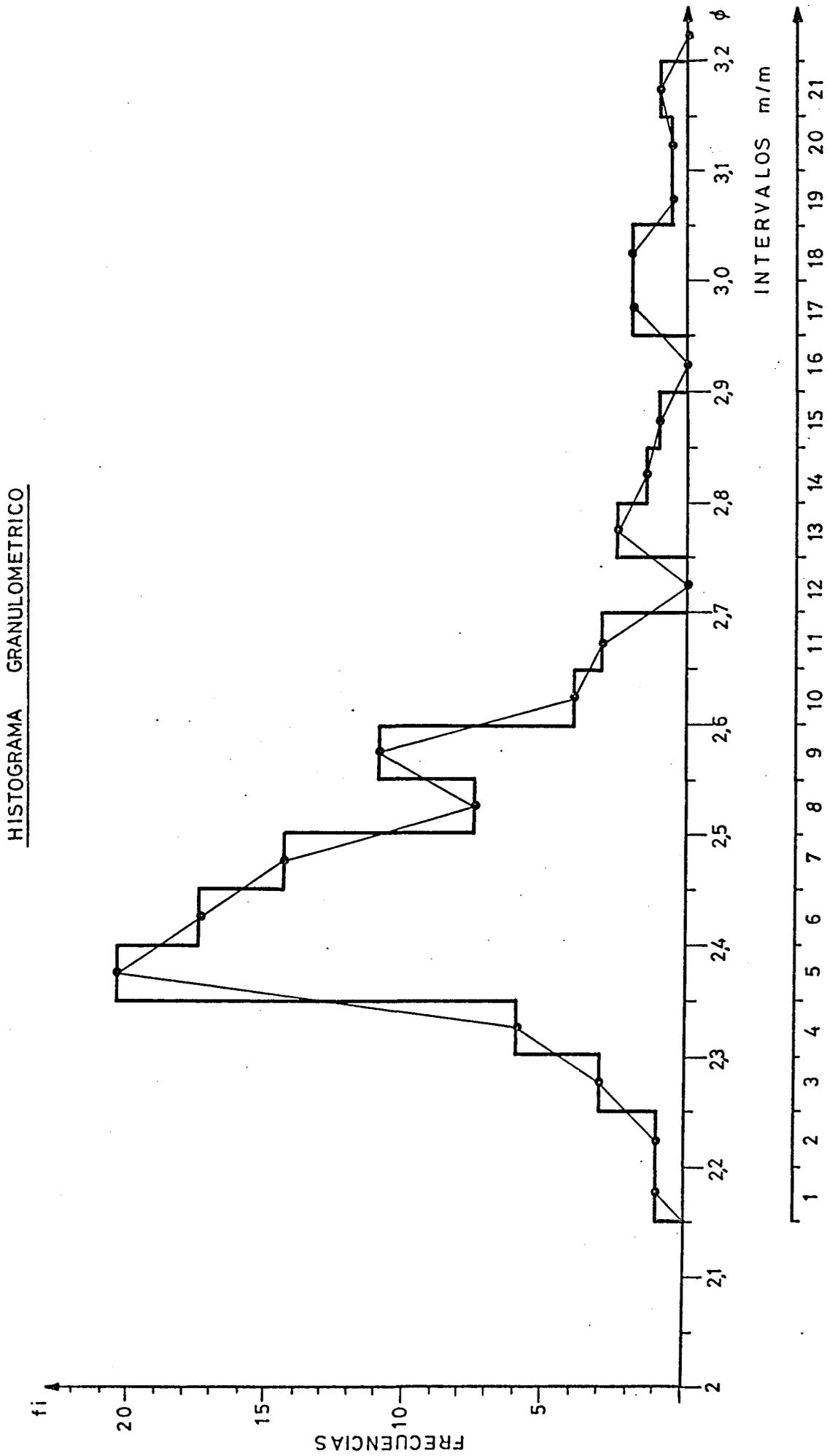
GRANULOMETRIA HOMOMETRICA

DIAMETRO MEDIO 2,5026 m/m



— CARACTERIZACION DEL MEDIO POROSO —

Fig. 4.8



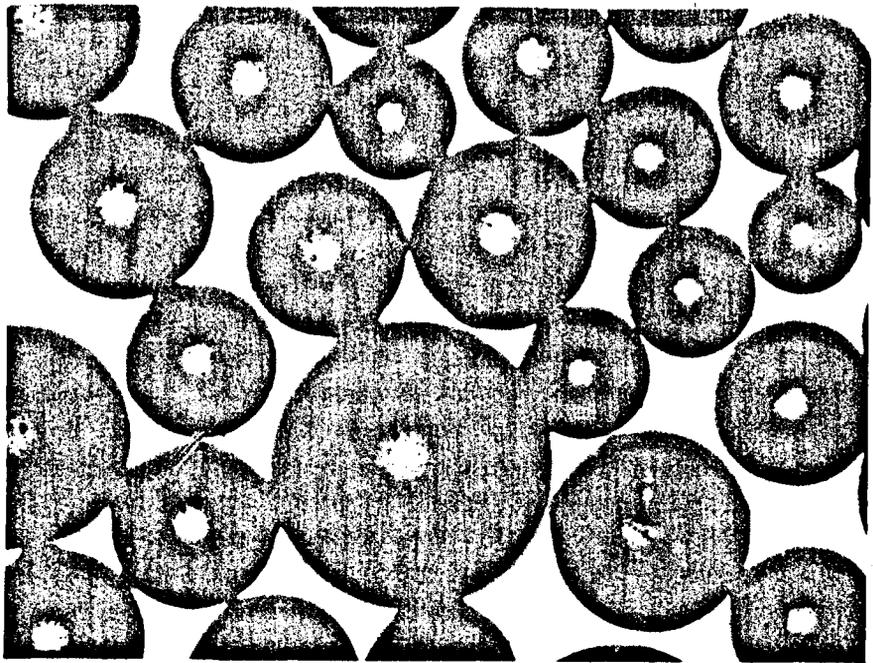


Figura 4.6.

El medio poroso se consolida con ARALDITE. - Este encolante permite bañar la superficie de las esferas para que éstas se consoliden sin producir taponamiento de los poros (24) (Fig. 4.9. y 4.10). El hecho de que se consolide el medio poroso se debe al interés de obtener

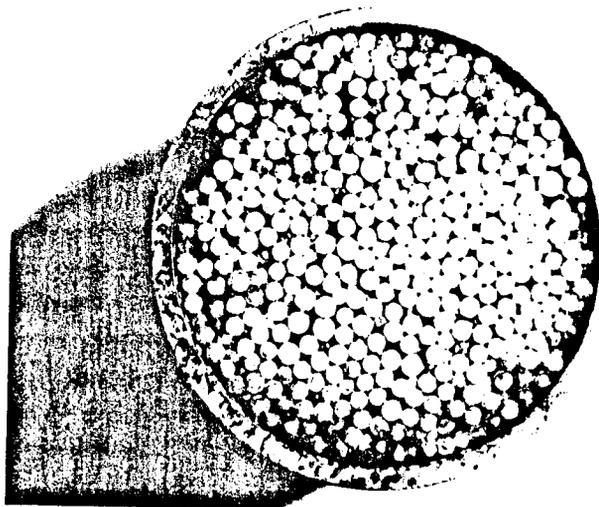


Figura 4.9.

unas características geométricas del filtro constantes - en el tiempo imposibilitando reacomodaciones, grietas, - canales preferenciales, fluidificaciones, etc.

La granulometría uniforme y la consolidación del medio poroso permite la reproductividad de éste y la simplificación de parámetros que, en otro caso, intervenirían en el fenómeno.

4.2.2. - EJECUCION DEL MODELO

El medio poroso va encerrado en anillas de - bronce de 8 cm. de diámetro interior por 5 cm. de longitud y 7 m/m de espesor. (fig. 4.10 y 4.11). El espesor -

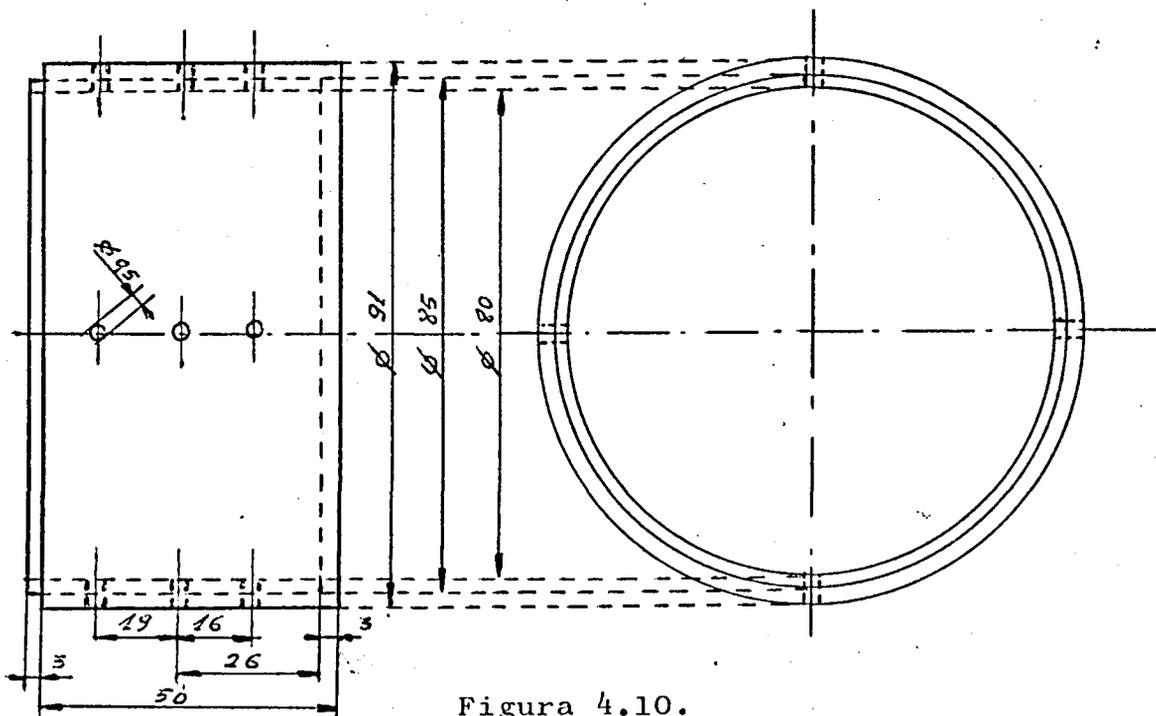


Figura 4.10.

es suficiente para que las tomas de presión, de diámetro 0,5 m/m., tengan una relación longitud/diámetro mayor de 5. Los anillos llevan unos encajes para formar una columna que se rigidiza por medio de cuatro tirantes de acero, redondos y roscados, que sujetan dos ensanchamientos cónicos extremos a 30° . Las uniones de los anillos se impermeabilizan con juntas elásticas de caucho. Dos discos, a modo de tapones, permiten presionar sobre la masa del medio poroso durante el llenado de los anillos para su compactación y homogenización. En la fig. 4.11. se aprecian los elementos descritos.

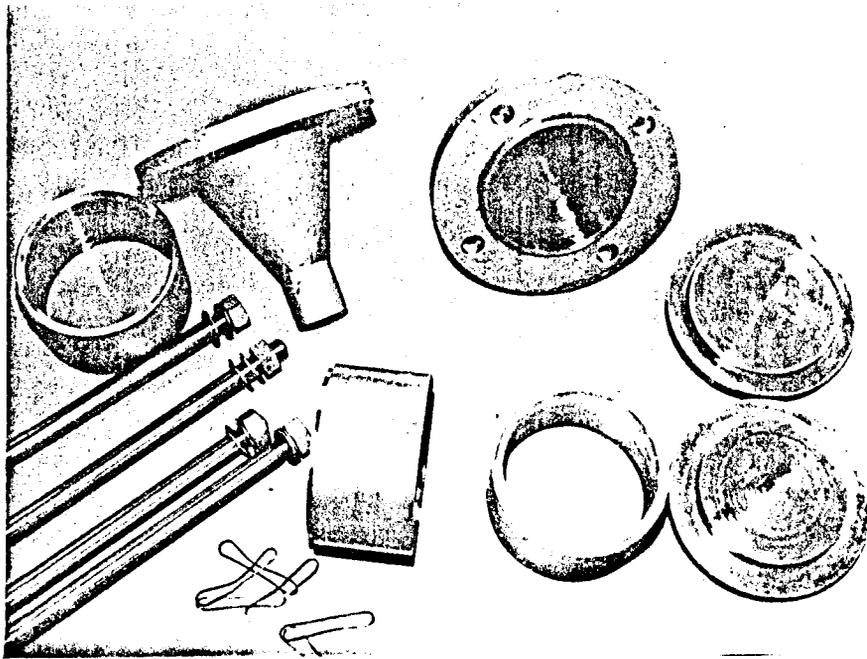


Figura 4.11.

El llenado de los anillos se ha realizado en dos etapas. En la primera, se preparó una mezcla de ARALDITE y de STYROPOR con gran proporción del primero hasta conseguir que el encolante llenara los poros entre las esferas. En esta mezcla se tapizó parcialmente las paredes de los anillos (fig. 4.12) con el fin de evitar zonas de paso preferenciales del fluido al quedar las esferas tangentes a las paredes del anillo, dejando conductos de circulación preferencial.

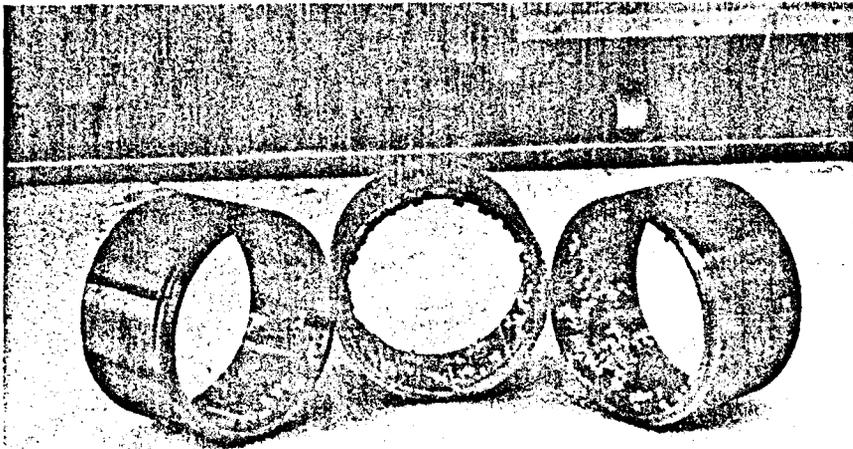


Figura 4.12.

En la segunda etapa se llenó la totalidad del anillo con la mezcla esferas-encolante indicada inicialmente. Una vez lleno un anillo, se encajaba el siguiente, interponiendo un film de plástico que, una vez seco el pegamento, era arrancado (fig. 4.13).

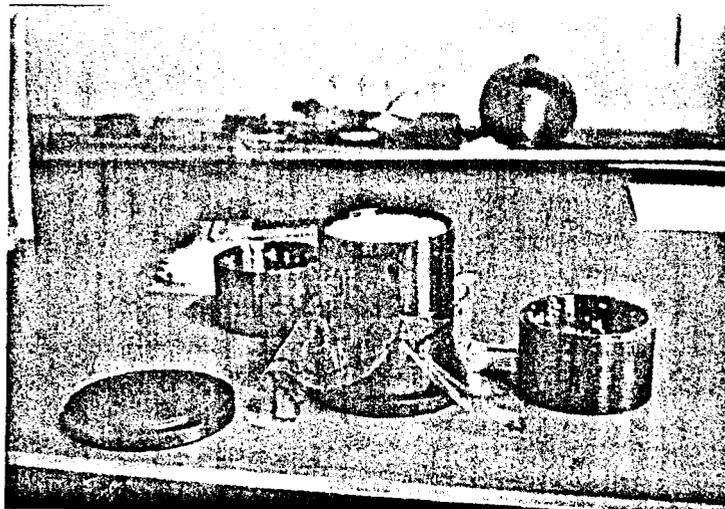
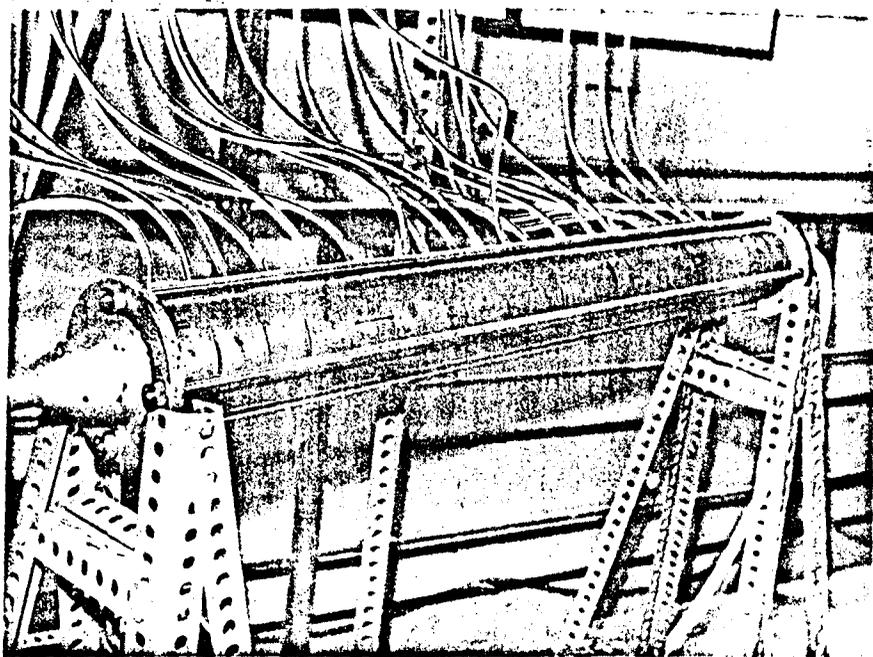
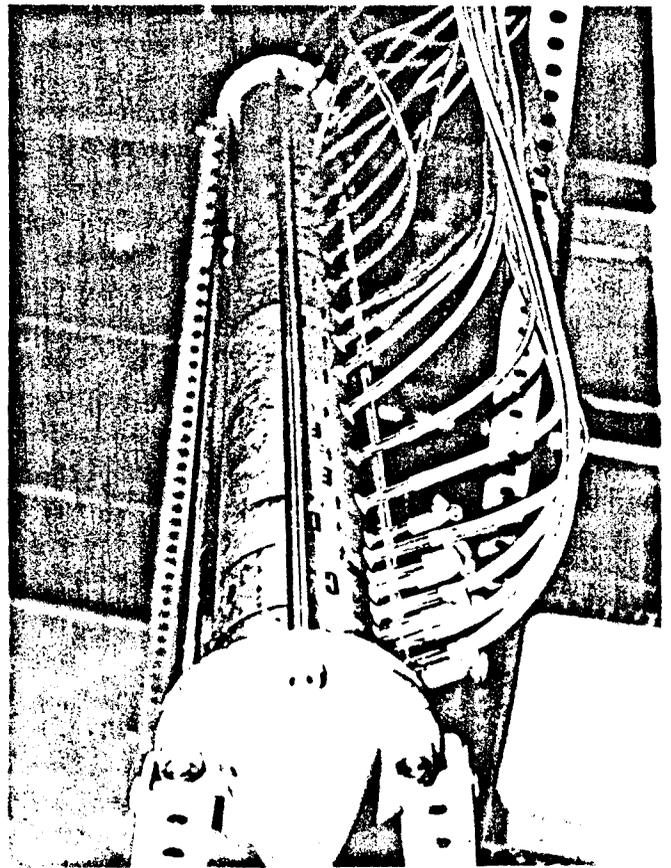
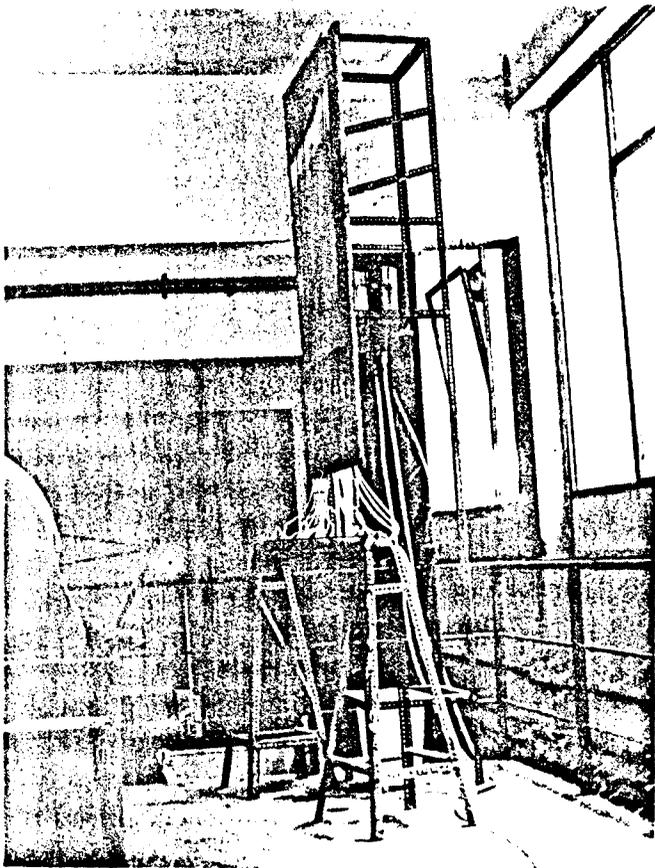


Figura 4.13.

El llenado de los anillos se efectuó cuidadosamente para evitar huecos internos, para lo que se procedió al llenado por capas aplicando vibrado con varilla y presión.

Una vez suprimido el film de plástico, se consigue el encaje perfecto de las esferas, componentes del medio poroso, de un anillo con el contiguo, de tal forma que no son intercambiables, debiéndose de montar siempre en la misma posición y orden. Este método permite tener un filtro homogéneo e isótropo y, por lo tanto, son discontinuidades, formado por 20 anillos y con posibilidad de acceso interno para realizar en él observaciones de todo tipo.

Cada anillo lleva un mínimo de cuatro tomas de presión a 90°. Los tres primeros anillos, según el sentido del flujo, llevan doce tomas de presión en tres grupos de cuatro. De este modo queda prevista cualquier eventualidad de obstrucción, así como se prevé la posibi



lidad de medidas medias en una sección, en el caso de - presentar diferentes orientaciones las tomas de presión. (fig. 4.14).

Las tomas de presión del filtro van conectadas a una batería 28 piezómetros (fig. 4.15 y 4.16) de - columna de líquido, en que se pueden hacer las lecturas con una precisión de 1 m/m a 0,001 m/m, según se emplee la lectura directa o la ayuda del catetómetro del laboratorio de HIDRAULICA.

El circuito consta de un recipiente colector y de una bomba centrífuga, marca PRAT de 2000 l/h, aproximadamente de caudal, con doble salida (una en by-pass al recipiente colector y otra al depósito de nivel constante, fig. 4.17 y 4.18, situado en la torre que sostiene los piezómetros).

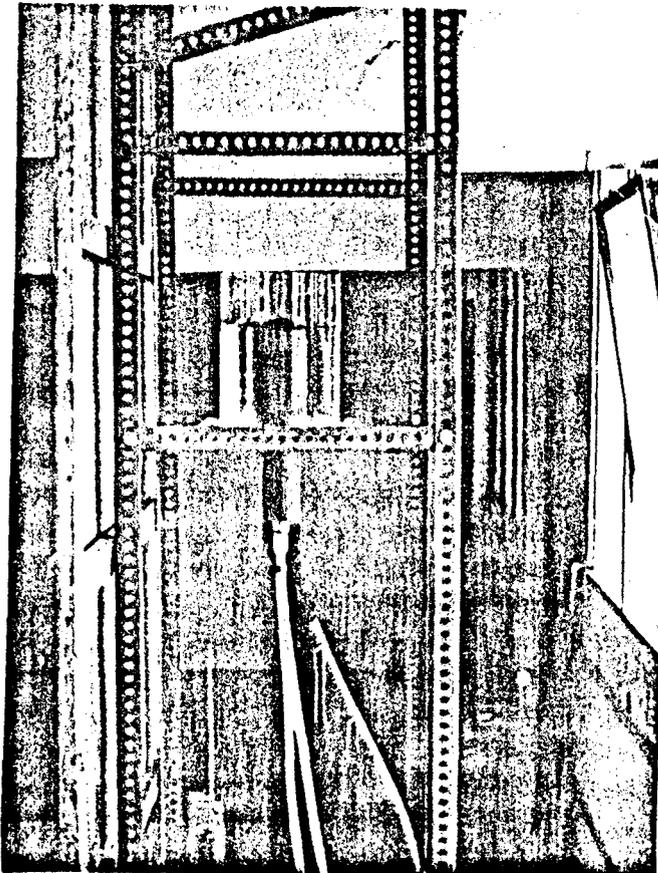


Figura 4.17.

El recipiente de nivel constante tiene una salida de retorno y otra de alimentación al filtro. La salida del filtro va al recipiente colector, regulándose el caudal en este punto mediante una válvula.

El filtro y la alimentación están calorífugados, teniendo un control termométrico a la entrada y a la salida. El termostatao se realiza en paralelo con el recipiente colector, en el cual hay un circuito auxiliar de refrigeración (fig. 4.18).

Las medidas de caudal se hacen por volumetría en recipiente aforado y con un cronómetro.

Las dimensiones relativas del filtro son relación longitud-diámetro $I/D = 100/8 = 12,5$, siendo la mayor que se ha encontrado en la bibliografía de 10 (40), y los valores más frecuentes entre 0,5 y 3 (23,44) y la relación diámetro filtro-diámetro de partícula $D/d = 80/2,475 = 31$, siendo también la máxima encontrada de 30,2 (40) y las más frecuentes entre 10 y 20 (23). El interés de estas dimensiones se debe, en el primer caso, al aumento de precisión en la medida del gradiente de presiones y, en el segundo, a la disminución de los efectos de derrame preferencial en la pared e influencia de ésta, lo que también se ha previsto encolando esferas en ella con un mayor porcentaje de ARALDITE.

En conclusión, se ha conseguido un medio poroso que sigue las hipótesis enunciadas por ser homogéneo, isótropo, que es reproducible, y su granulometría uniforme y esférica permite eliminar fenómenos secundarios del

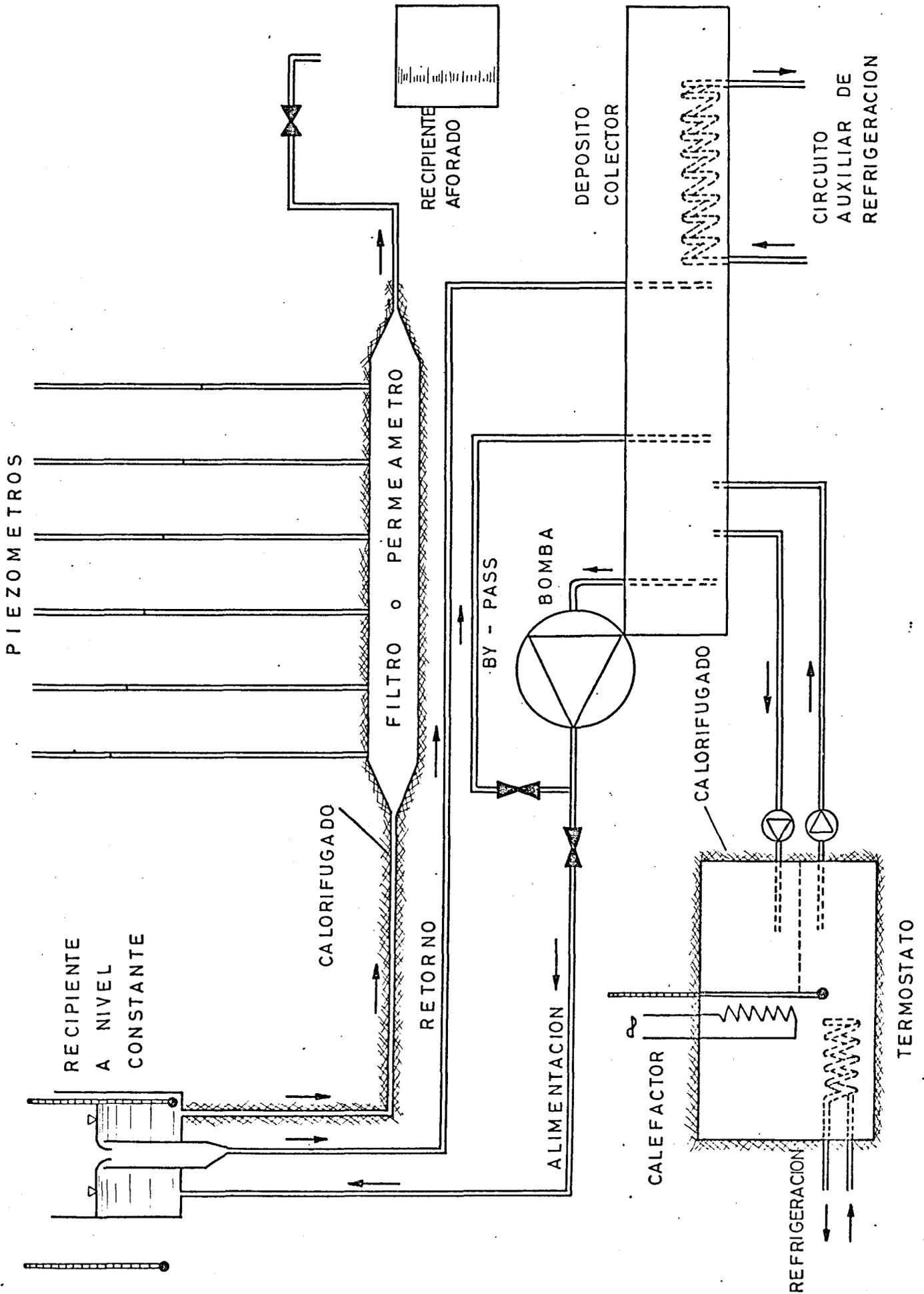


Fig. 4.18

ESQUEMA DE LA INSTALACION

derrame; es consolidado (de características constantes - en el tiempo) y sin efectos anómalos en el flujo, debido a esta consolidación, al recubrimiento de las paredes y a su relación diámetro del filtro-diámetro de partículas. El filtro permite determinar, *per se*, con gran precisión los gradientes hidráulicos gracias a su elevada relación longitud.diámetro y es inspeccionable en su interior para realizar controles y actuar según convenga.

4.2.3. - CARACTERIZACION DEL FILTRO. DERRAME DEL FLUIDO NEWTONIANO

Las características que definen un medio poroso desde el punto de vista hidrodinámico son la porosidad y la permeabilidad. En otro nivel se encuentran el radio hidráulico (concepto teórico), la superficie específica, la tortuosidad, la forma, tamaño e interconexión de los poros y la forma y tamaño de los granos y su distribución (curva granulométrica), éstos ya definidos en el apartado 4.2.2.

4.2.3.1. - DETERMINACION DE LA POROSIDAD

Simultáneamente a la ejecución del filtro se construyó otro con los mismos materiales y con el mismo procedimiento, pero teniendo como envolvente un tubo de

plástico. De este segundo se sacaron secciones serrándolo. Estas secciones fueron fotografiadas (fig. 4.19) para ob

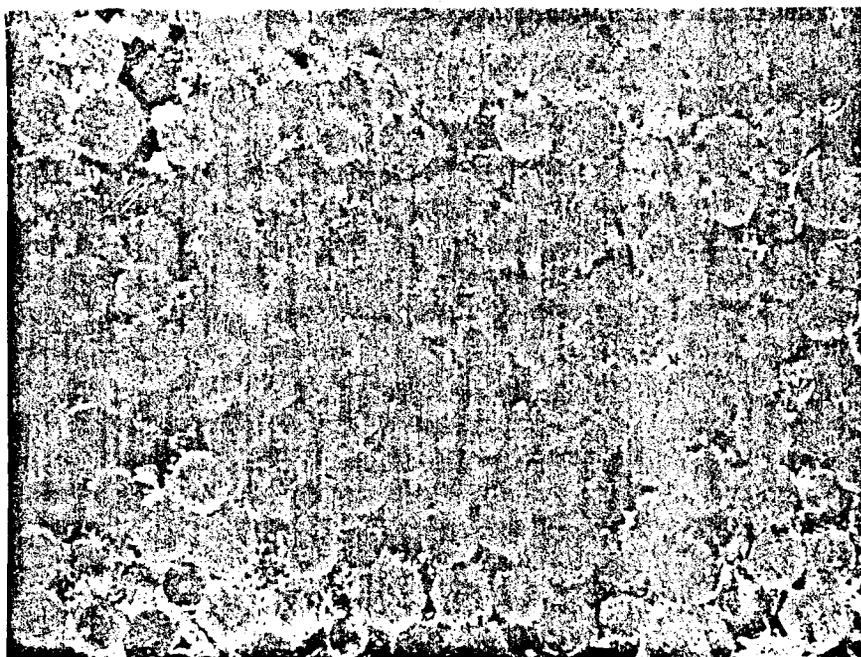


Figura 4.19.

servar el acabado interior del filtro (homogeneidad e isotropía), la conexión entre los poros (porosidad abierta) y proceder al cálculo de la porosidad de superficie por planimetría sobre las diversas fotografías de las - muestras. Las mismas muestras han sido estudiadas por vo lumetría, obteniéndose la porosidad útil o efectiva.

El estudio estadístico de este doble proceder ha dado como resultado :

Porosidad total bruta	0,339
Porosidad geométrica	0,337
Porosidad útil	0,30855

Estos valores se han obtenido: el primero, - del método fotográfico; el segundo, por determinación - geométrica (nº de partículas esféricas por unidad de volumen, conociendo el diámetro de cada partícula); y en - el tercero, por inmersión en agua de larga duración para eliminar el aire ocluido. Las diferencias entre ellos se justifican por la desaparición de esferas durante el sec - cionado y posterior manipulación en el procedimiento fo - tográfico y por retención capilar de aire y posiblemente algo de porosidad ocluida en el procedimiento de inmer - sión. En conclusión, podemos cifrar la porosidad en :

$$m = 0,337$$

En ningún momento se ha intentado calcular - la porosidad cinemática, por ser función del fluido que circula y también del sólido constituyente del medio po - roso y la forma de éste.

4.2.3.2. - DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD

Dos procedimientos generales encontramos pa - ra determinar la permeabilidad de un medio poroso. El - teórico, basado en fórmulas empíricas, y el experimental, propiamente dicho, basado en la aplicación de la ley de DARCY para fluidos newtonianos.

En el método experimental se han empleado dos fluidos, la glicerina y el agua, para poder obtener una amplia gama de caudales específicos (de 0,08 cm/s hasta 1,44 cm/s) con unos gradientes hidráulicos aparentes no muy elevados (desde 0,0021 hasta 0,056), cubriendo valores del número de REYNOLDS desde 0,209 hasta 38,2, entendiéndose como :

$$\text{Caudal específico : } q = \frac{Q}{S \text{ total}}$$

$$\text{Gradiente hidráulico } i = \frac{\Delta P}{L \text{ aparente}}$$

$$\text{Número de REYNOLDS } Re = \frac{d_{50\%} \cdot q \cdot \rho}{\mu}$$

El concepto empleado para determinar la permeabilidad intrínseca es el de analogía capilar y régimen laminar. La analogía capilar permite determinar, a través del coeficiente de fricción :

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{cte.}$$

el final del derrame laminar en el medio poroso y, por lo tanto, el límite de aplicación de la ley de DARCY y del concepto de permeabilidad intrínseca (Anejo 4.1.) (Fig. 4.20 y 4.21). Así, se encuentra que el número de REYNOLDS crítico se sitúa alrededor del valor 2 y, para esta zona de derrame laminar, la permeabilidad intrínseca vale :

$$k_o = 0,0003055 \text{ cm}^2.$$

es decir, 30.550 DARCY.*

NOTA.- La distancia cuadrática media de estos cálculos tiene un valor máximo de 1,09 y $\sigma = 45 \cdot 10^{-7}$

— CARACTERIZACION DEL MEDIO POROSO —

Fig. 4. 20

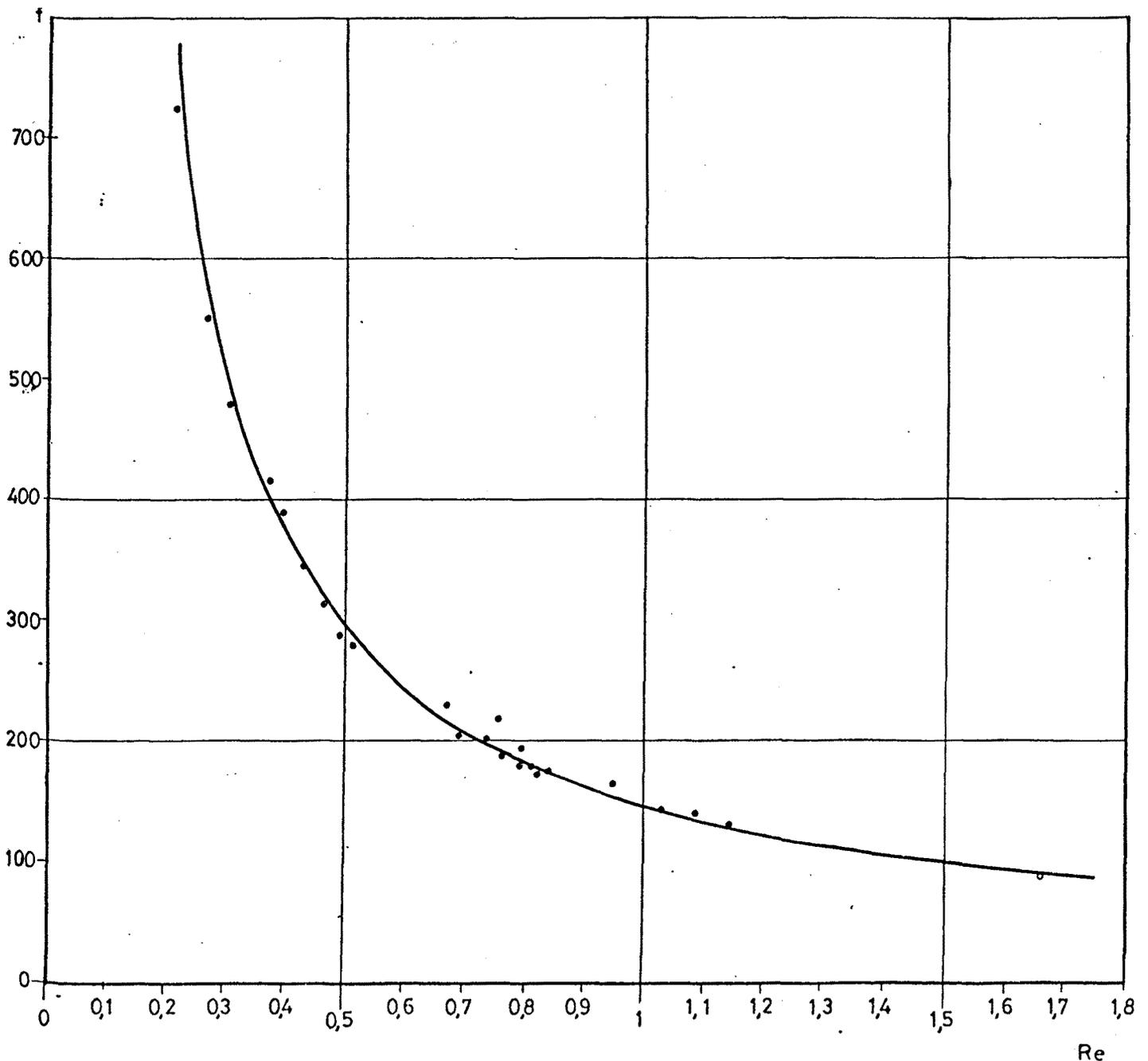
VARIACION DEL COEFICIENTE DE PERDIDA DE CARGA f EN FUNCION DEL NUMERO DE REYNOLDS Re EN UN MEDIO POROSO

FLUIDO GLICERINA A TRAVES DEL MEDIO POROSO

EXPRESIONES EMPLEADAS

$$\Delta H = f \cdot \frac{\Delta L}{4 \cdot R_H} \frac{(Q/st)^2}{2 \cdot g} \quad ; \quad R_H \text{ RADIO HIDRAULICO ESTADISTICO}$$

$$Re = \frac{D \cdot (Q/st) \cdot \rho}{\mu} \quad ; \quad D \text{ DIAMETRO MEDIO DE LAS PARTICULAS}$$



- CARACTERIZACION DEL MEDIO POROSO -

Fig. 4.21

VARIACION DEL COEFICIENTE DE PERDIDAS DE CARGA f EN
 FUNCION DEL NUMERO DE REYNOLDS Re EN MEDIO POROSO

EXPRESIONES EMPLEADAS

$$\Delta H = f \cdot \frac{\Delta L}{4 \cdot R_H} \frac{(Q/ST)^2}{2g}$$

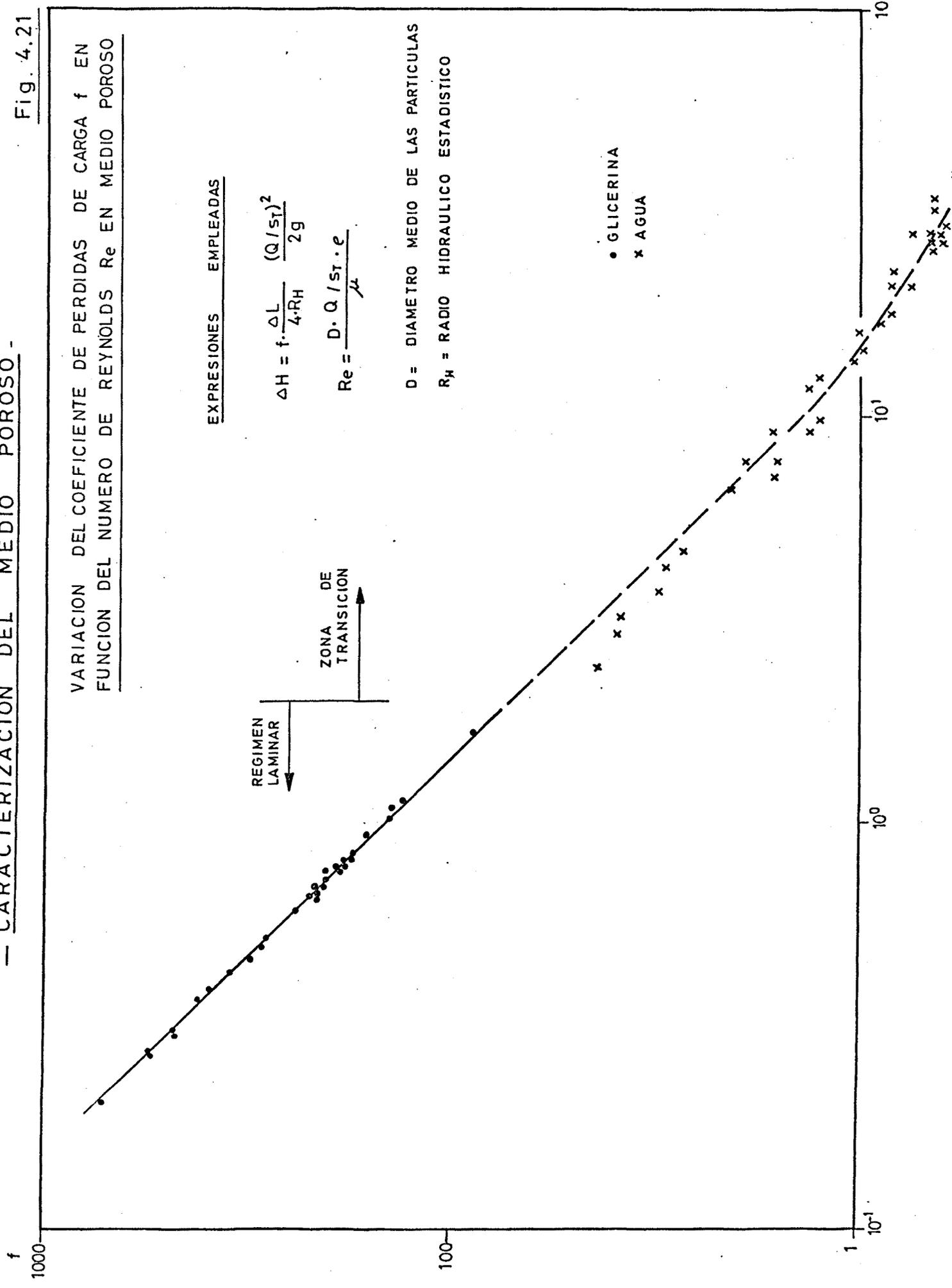
$$Re = \frac{D \cdot Q / ST \cdot e}{\mu}$$

D = DIAMETRO MEDIO DE LAS PARTICULAS

R_H = RADIO HIDRAULICO ESTADISTICO

• GLICERINA
 x AGUA

REGIMEN LAMINAR
 ZONA DE TRANSICION



El cálculo, a partir de las expresiones teóricas, nos lleva a resultados expresados en la tabla I, que nos confirman el estudio experimental.

4.2.3.3. - DETERMINACION DE LAS RESTANTES CARACTERISTICAS

Las restantes características que quedan por considerar son la superficie específica, el radio hidráulico y la tortuosidad.

El concepto de superficie específica es el cociente de la superficie sólida por volumen sólido. Para una granulometría uniforme (Anejo 4.1) (45) :

$$S \text{ esp} = \frac{6}{d V_{Sm}}$$

Partiendo de esta expresión, se encuentra el valor de $0,236 \text{ cm}^{-1}$.

Del análisis geométrico, número de esferas, medida de sus diámetros, cálculo de sus superficies y volúmenes y medida del volumen ocupado, se ha calculado el valor de la superficie específica, encontrándose :

$$S \text{ esp}_{\text{exp}} = \frac{\text{Sup. sólido}}{\text{Vol. sólido}} = 0,202 \text{ cm}^{-1}$$

Del concepto de radio hidráulico en conductos, aplicado a los medios porosos, se deduce la expresión teórica (Anejo 4.1.)

AUTOR	EXPRESION	VALOR OBTENIDO cm ²
KOZENY-modificado de MASSARANI	$k_0 = \frac{m^3 d^2}{72 (1-m)^2}$	0,00029009
KOZENY-original (COLLINS)	$k_0 = \frac{c \cdot m^3}{Sep^2}$ Sep = 6/d c = 0,5(esfera)	0,00035018
BLAKE-KOZENY	$k_0 = b \cdot \frac{d^2 m^3}{(1-m)^2}$ b = c/16	0,0003281
NUMER	$k_0 = \frac{m^2}{(1-m)^2} d^2$ = /6 = 152 + 207	0,000252 a 0,00398
KOZENY-FAIR- HATCH (SCHNEBELI)	$k_0 = c \left(\frac{V}{S}\right)^2 \frac{m^3}{(1-m)^2} =$ = c $\frac{30}{(1-m)^2}$ c(4/5) ² = 1/16	0,000346
BLAKE-KOZENY MASSARANI	$k_0 = b \frac{d^2 m^3}{(1-m)^2}$ b = 4,3 · 10 ⁻³	0,000253
Del modelo en- vilar (GIFR)	$k_0 = \frac{d^2 m^3}{72 \cdot t^2 \cdot (1-m)^2}$ t = tortuosidad	0,000307
WATSON	$k_0 = c \cdot d_{10}^2$ c = 150 (m/45) ⁶	0,000176

AUTOR	EXPRESION	VALOR OBTENIDO cm ²
SLICHTER	$k_0 = c \cdot d_{10}^2 \cdot m^n$ n = 3,3 c tabulado	0,000483
BACHMETEPP	$k_0 = c d^2 \cdot m^{4/3}$ c = 170	0,00023

TABLA I

$$R_H = \frac{m \cdot d}{6 \cdot (1-m)} \quad ; \quad \frac{6}{d} = S \text{ esp.}$$

De aquí se obtiene $R_H = 0,216 + 0,25 \text{ mm.}$, según se emplee la S esp. teórica o la determinada geométricamente.

La aplicación de la analogía capilar, en el estudio realizado con fluidos newtonianos, da como resultado el valor de $R_H = 0,25 \text{ mm.}$ El valor teórico y el experimental coinciden sensiblemente.

El radio hidráulico deducido de la analogía capilar puede ser distinto según la elaboración de la analogía. Así, en la aplicación de la expresión :

$$\Delta H = f \frac{\Delta L}{4 \cdot R_H} \cdot \frac{(Q/Sp)^2}{2g} \quad \text{con } f = \frac{64}{Re}$$

empleada para el cálculo del radio hidráulico citado, no se tienen en cuenta ni la porosidad, ni la tortuosidad, conceptos influyentes en el derrame y, por lo tanto, en las pérdidas de carga. Si empleamos estos conceptos, tendremos que el nuevo radio hidráulico es :

$$R'_H = R_H \cdot \sqrt{\frac{t'}{m}} = 0,69 \text{ mm.}$$

valor que, comparado con el diámetro de la partícula (d_{70}), da una relación :

$$d_{70} = 3,7 \cdot R'_H$$

muy análogo al empleado en buena parte de la literatura clásica :

$$d_{70} = 4 \cdot R_H$$

La aplicación de la ley de DARCY y de la analogía capilar nos lleva a la expresión :

$$k_o = \frac{d^2 \cdot m^3}{72 \cdot t' \cdot (1 - m)^2}$$

de donde se puede deducir el valor de la tortuosidad de los ensayos de flujo con fluidos newtonianos, siendo éste :

$$t' = 2,55$$

En la tabla II se resumen las características del medio poroso cuya determinación, ya sea teórica o experimental, se ha expuesto en este apartado 4.2.3. y que permite el inicio de las experiencias de derrame con fluidos no newtonianos.

TABLA II

CARACTERISTICAS DEL MEDIO POROSO	
GRANULOMETRIA	
Coeficiente de uniformidad	$\lambda = 1$
d_{70}	= 2,55 mm.
d_{50}	= 2,475 mm.
d_{10}	= 2,325 mm.
POROSIDAD	$m = 0,337$
PERMEABILIDAD	$k_o = 0,0003055 \text{ cm}^2$
RADIO HIDRAULICO R_H	= $0,216^* + 0,255$ mm.
SUPERFICIE ESPECIFICA Sep	= $2,36^* + 2,02 \text{ mm}^{-1}$
TORTUOSIDAD	$t' = 2,55$
*Valor teórico	

4.3.1. - DESCRIPCION DE LOS ENSAYOS

La instalación presentada en el apartado 4.2 (fig. 4.18), en el cual se desarrolla la caracterización del medio poroso, es la empleada para estudiar el flujo del fluido no newtoniano de carácter pseudoplástico.

Los fluidos, a base de soluciones en agua de CMC da concentraciones en seco a 105 °C, de 10,3; 9,68; 8,92; 8,2; 7,47; 6,45; 5,13; 4,76 %, realizándose los en sayos a diversas temperaturas situadas entre 44,4 °C y - 21,9 °C.

La instalación ha permitido realizar el estu dio entre caudales que van desde 21,6 cm³/s a 1,02 cm³/s, lo que supone, dada la sección del filtro, velocidades - de DARCY entre 0,431 y 0,02 cm/s y velocidades medidas - en el poro del orden de 1,18 a 0,054 cm/s. Esto ha signi- ficado alcanzar saltos de presión, entre la entrada y sa lida del filtro, de alrededor de 900 mm. de columna de - líquido, lo que nos lleva a gradientes hasta de 795 dinas /cm³, -0,81 mcdl/mm., próximos a la unidad y muy eleva- dos para un medio poroso.

La gama de concentraciones y temperaturas em pleadas supone la realización de los ensayos con índices de pseudoplasticidad que van desde 0,765 a 0,839 y coefi- cientes de consistencia de 0,295 a 0,89 dinas.sⁿ/cm².

Se ha controlado sistemáticamente el volumen aportado en cierto intervalo de tiempo, las presiones en once tomas y la temperatura en la instalación para cada

caudal. Finalmente, sobre el fluido empleado, se realizaron los reogramas en el viscorímetro cono-plato FERRANTI, para diversas temperaturas y, en varios casos, antes y - después de los ensayos de filtración, no observándose en vejecimiento de las características reológicas del fluido debido al proceso de cizallado al que se ve sometido en el filtro.

Las concentraciones inferiores, 5,13 y 4,76%, sufrieron degradación de tipo biológico, presentándose - en ellas como colonias de algas que alteraron su comportamiento. Es de suponer que esta degradación se debe a - un fortuito sembrado en las botellas de muestreo, que impidieron la obtención de reogramas correctos. Debido a - esto, sólo se han podido estudiar 231 caudales, de los - 440 ensayados, lo que supone un promedio de siete temperaturas diferentes para cada concentración y cinco caudales para cada temperatura.

Las medidas de estos ensayos han sido elaboradas con un programa en lenguaje BASIC, descrito en el Anejo IV.B de este capítulo. Se ha limitado la distancia cuadrática media máxima para que un ajuste se considere aceptable al valor 5, siendo el orden de magnitud de las presiones de 200 a 900.

4.3.2. - RESULTADOS OBTENIDOS

En la exploración de las medidas realizadas

se ha procedido de manera que, partiendo de los datos :

- Índice de pseudoplasticidad (n)
- Coeficiente de consistencia (K)
- Volumen aportado
- Tiempo (t)
- presiones en los diversos piezómetros (h ó p),

se obtuvieron los siguientes valores :

(a) - Coeficientes :

$$\psi_1 = \frac{K}{12} \left[3 \left(\frac{3n + 1}{n} \right) \right]^n (72 \cdot k_o \cdot t' \cdot m)^{\frac{1-n}{2}}$$

y $\psi_2 = 1 \cdot t'^{n-1}$

de la ley de DARCY generalizada en el apartado 4.1.4. para cada serie de caudales y diversas temperaturas.

- (b) - Caudales y velocidades de DARCY para cada volumen y tiempo.
- (c) - Ajuste de las alturas piezométricas con las distancias de los piezómetros al origen del filtro, deduciéndose el gradiente de presiones adimensional y en dinas/cm³.
- (d) - Coeficiente modificador del número de REYNOLDS para cada temperatura, siendo éste :

$$m^{2-1}$$

- (e) - Ajuste entre los gradientes de presiones y las velocidades de DARCY experimentales obtenidas. El ajuste se ha realizado sobre la expresión :

$$q^n = \frac{k_o}{\psi} \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

deduciéndose, como resultado, el exponente n y el coeficiente ψ , a comparar con los teóricos deducidos en el apartado (a).

- (f) - La velocidad teórica obtenible a partir del gradiente de presiones experimental observado y el gradiente de presiones necesario a partir de la velocidad experimental, empleando la expresión de DARCY generalizada con el valor teórico ψ_1 y el índice n de la reometría en el cono-plato.
- (g) - La relación entre las velocidades teórica y experimental y los gradientes de presiones teórico y experimental anteriormente deducidos.
- (h) - El coeficiente de DARCY ψ de la ley del mismo nombre generalizada, por cada caudal, empleando los valores de velocidad, gradiente de presión experimental y del índice n de las experiencias reométricas.
- (i) - La viscosidad de DARCY, calculada de la expresión de DARCY no generalizada.
- (j) - La viscosidad de un modelo capilar equivalente, expresión :

$$\mu_c = \frac{\Delta P}{L} \frac{8 \cdot n \cdot R_H^4}{Q}$$

- (k) - La viscosidad diferencial deducida del modelo de OSTWALD :

$$\mu_{\text{dif}} = n \cdot \mu_{\text{ap}} = n \cdot K^{1/n} \varphi^{n+1/n}$$

calculándose y empleándose para ella el valor del esfuerzo cortante medio en el medio poroso :

$$\varphi = \frac{\Delta P}{\Delta L} \frac{R^*}{2t'} ; R^* = 2 \left(\frac{2 k_o t'}{m} \right)^{1/2}$$

- (l) - Los números de REYNOLDS deducidos del análisis dimensional :

$$\text{Rel} = \frac{d^n \cdot \rho \cdot q^{2-n}}{K}$$

y el modificado, frecuente en la literatura :

$$\text{Re2} = \text{Rel} \frac{8}{\left(\frac{6n-2}{n} \right)^n}$$

Ambos se pueden transformar dividiéndolos por el coeficiente calculado en (d)

- (m) - El coeficiente de fricción de un modelo capilar :

$$f = \frac{\Delta P}{\Delta L} \frac{d \cdot 2}{q^2 \cdot \rho}$$

siendo d el diámetro característico del medio poroso.

4.3.2.1. - VISUALIZACION DEL COMPORTAMIENTO SEUDOPLASTICO

El medio poroso, al igual que cualquier otro límite geométrico impuesto al fluido, da origen a la aparición de cierta distribución de esfuerzos cortantes y - de gradientes de velocidades en el seno del fluido al moverse éste.

La geometría complicada impide la determinación precisa del gradiente de velocidades y de los esfuerzos cortantes en la pared y que, en el mejor de los casos, serían valores promedio.

El caudal, la velocidad de DARCY, la velocidad media en el poro o la velocidad media en el medio poroso son representativos del gradiente de velocidades para una geometría dada constante.

El esfuerzo cortante se manifiesta a través de una pérdida de carga en el filtro, es decir, de un - gradiente de presiones. La expresión de cálculo empleada en (k), de 4.3.2., es una aproximación del esfuerzo medio en los poros.

Las sucesivas transformaciones a aplicar al caudal y al gradiente de presiones nos da un incremento de las variaciones concomitantes de ambos, es decir, de la curvatura observada en una representación gráfica cartesiana de esfuerzos cortantes-gradientes de velocidades o reograma.

En las figuras 4.22 a 4.27 se observa la concavidad de las curvas del reograma hacia el eje de velocidades (gradiente de velocidades) y el desplazamiento de los reogramas hacia el mismo eje al aumentar la temperatura y disminuir la concentración, tal como se había observado en el capítulo III al estudiar la caracterización del fluido de comportamiento pseudoplástico.

4.3.2.2. - ANÁLISIS DE LA LEY DE DARCY GENERALIZADA

La ley de DARCY generalizada establece la relación entre la velocidad de DARCY, las características del medio poroso (permeabilidad intrínseca k_0 , porosidad m y tortuosidad t') y las del fluido (coeficiente de consistencia K , índice de pseudoplasticidad n y gradiente de presiones).

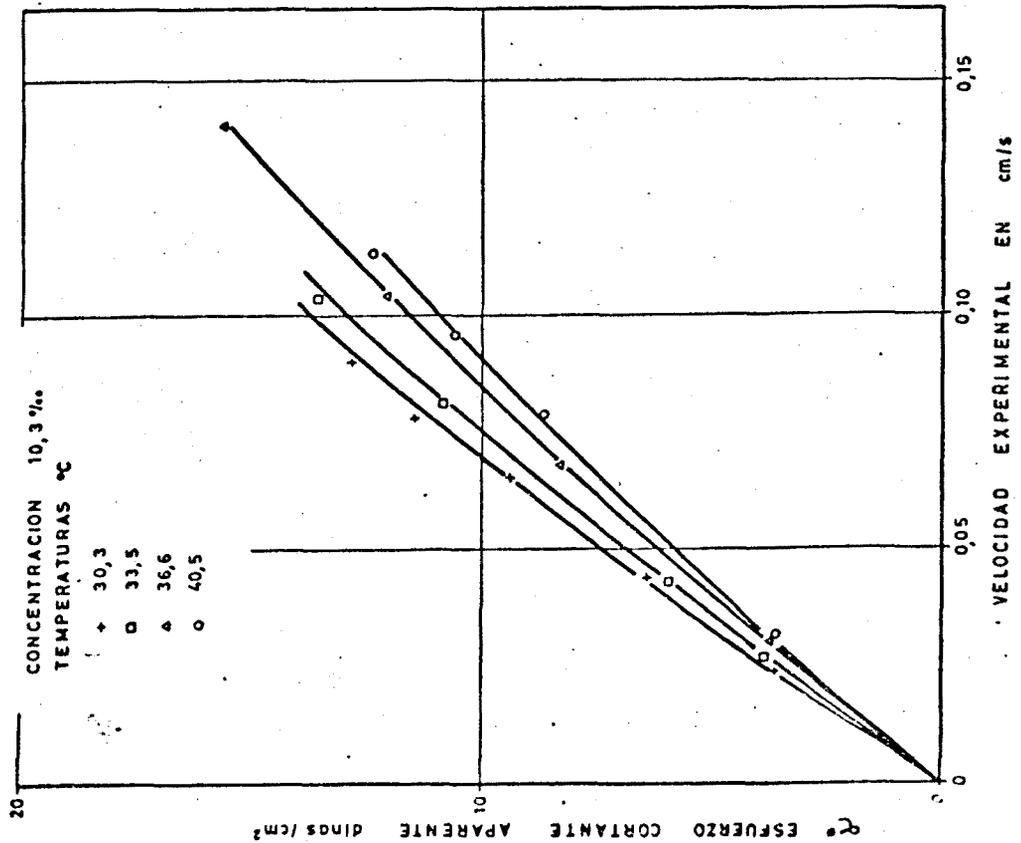
Partiendo de todos los valores, conocidos o determinados, de las diversas variables, se han realizado los cálculos de la función ψ teórica para cada temperatura, el ajuste de q y de $\Delta P / \Delta L$ (según los valores experimentales), el cálculo de q y de $\Delta P / \Delta L$ (teniendo en cuenta el índice de pseudoplasticidad n suministrado por el estudio de caracterización del fluido, apartado 4.3.2.1. a, e, f y h).

De los resultados obtenidos, deducimos una marcada diferencia entre los valores experimentales y los teóricos suministrados por la ley de DARCY generalizada.

FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.22

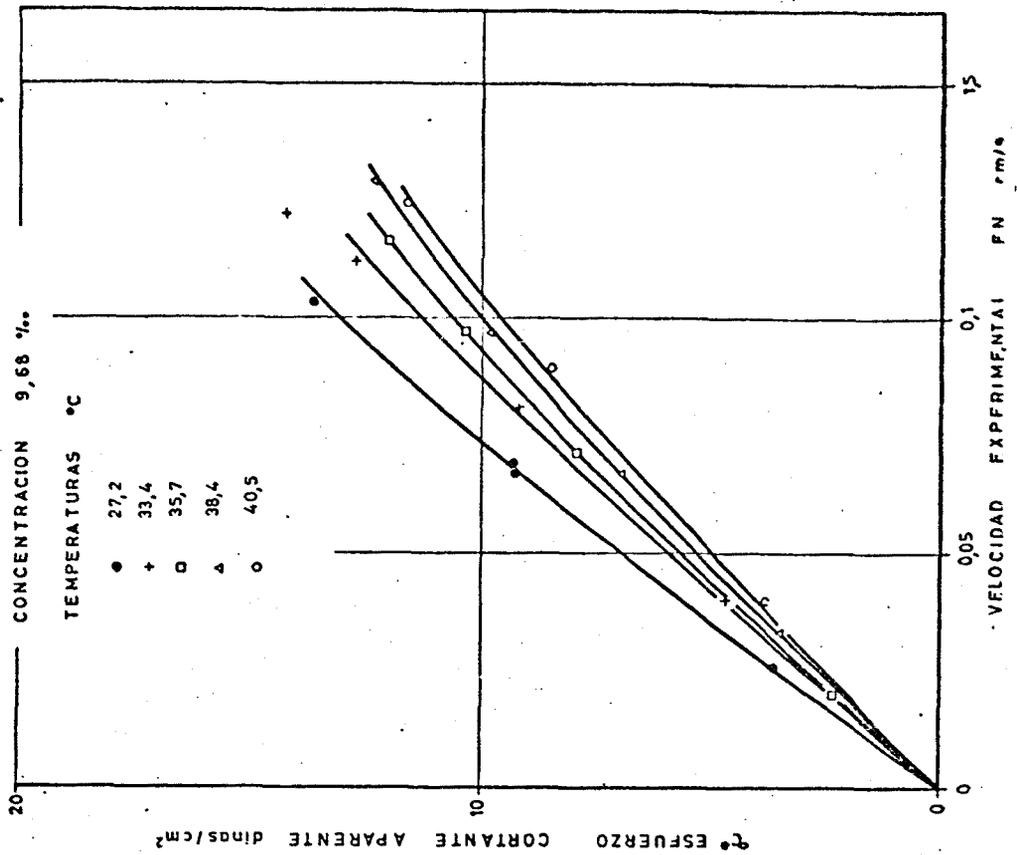
REOGAMA APARENTE DE LAS SOLUCIONES DE
C.M.C. EN AGUA
COMPORTAMIENTO SEUDOPLASTICO



FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.23

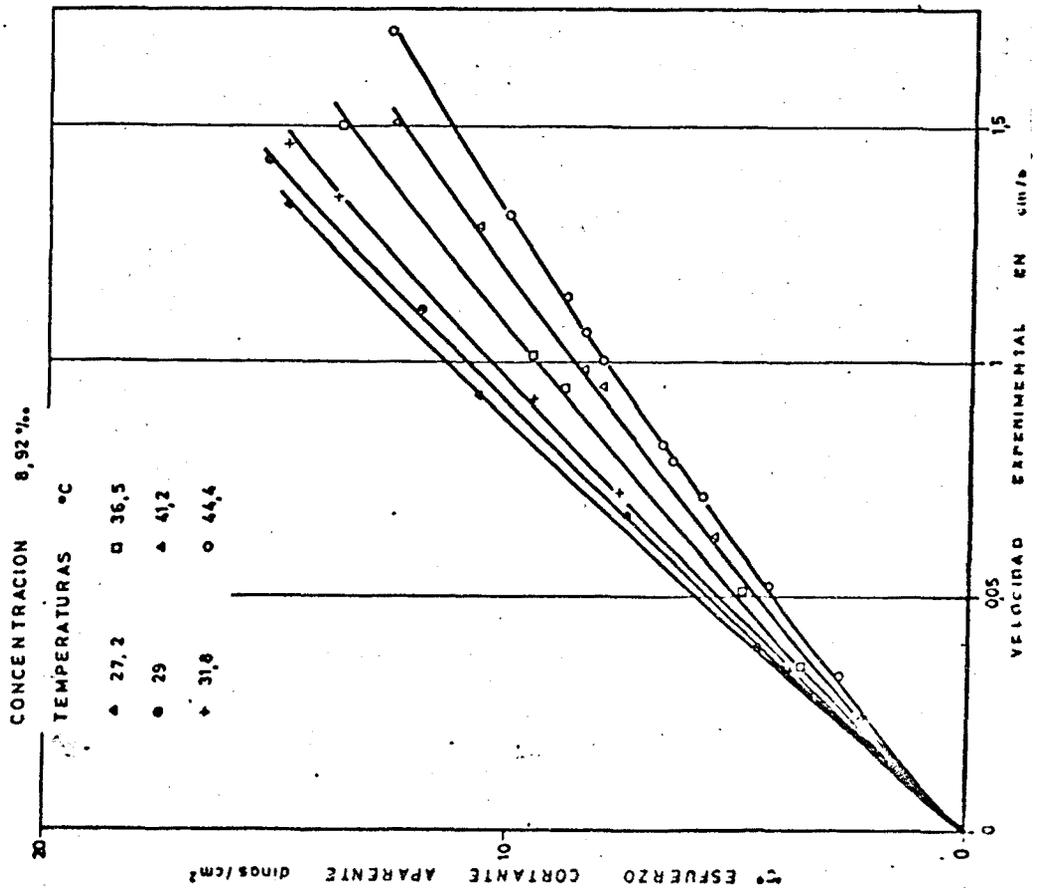
REOGAMAS APARENTES DE LAS SOLUCIONES
DE C.M.C. EN AGUA
COMPORTAMIENTO SEUDOPLASTICO



FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.24

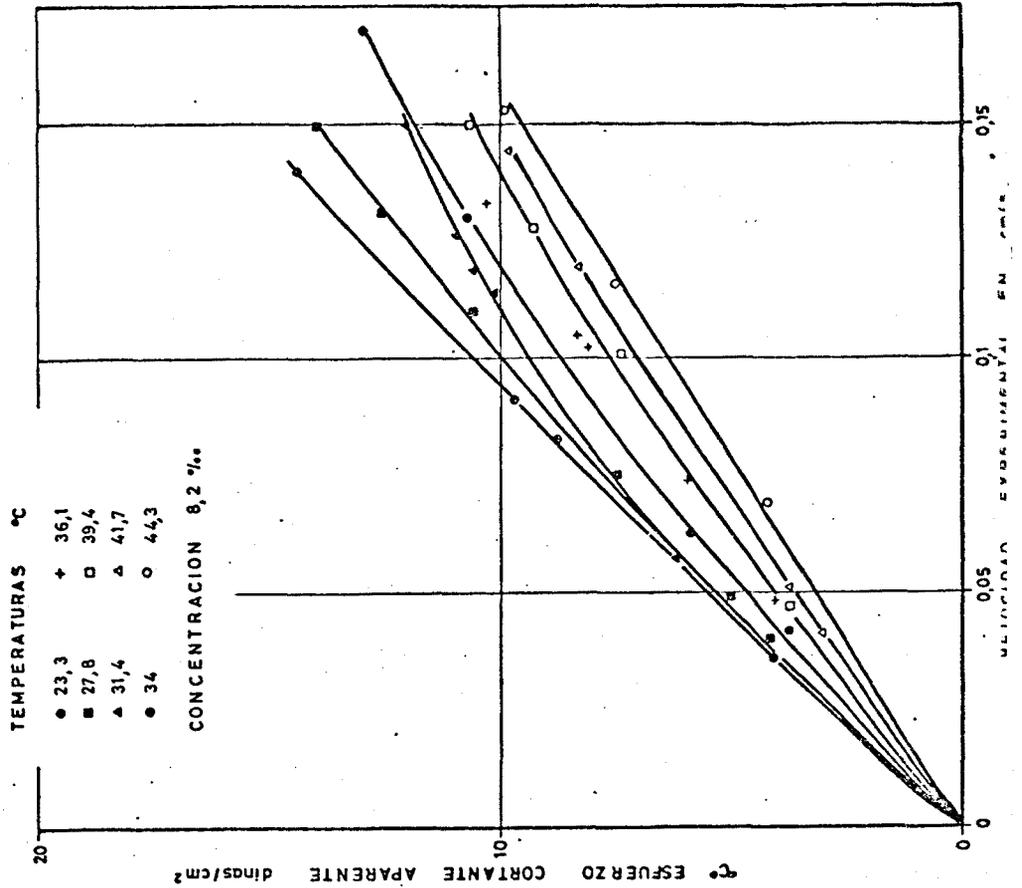
REOGRAMAS APARENTES DE LAS SOLUCIONES
DE C.M.C. EN AGUA
COMPORTAMIENTO SEUDOPLASTICO
CONCENTRACION 8,92%..



FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.25

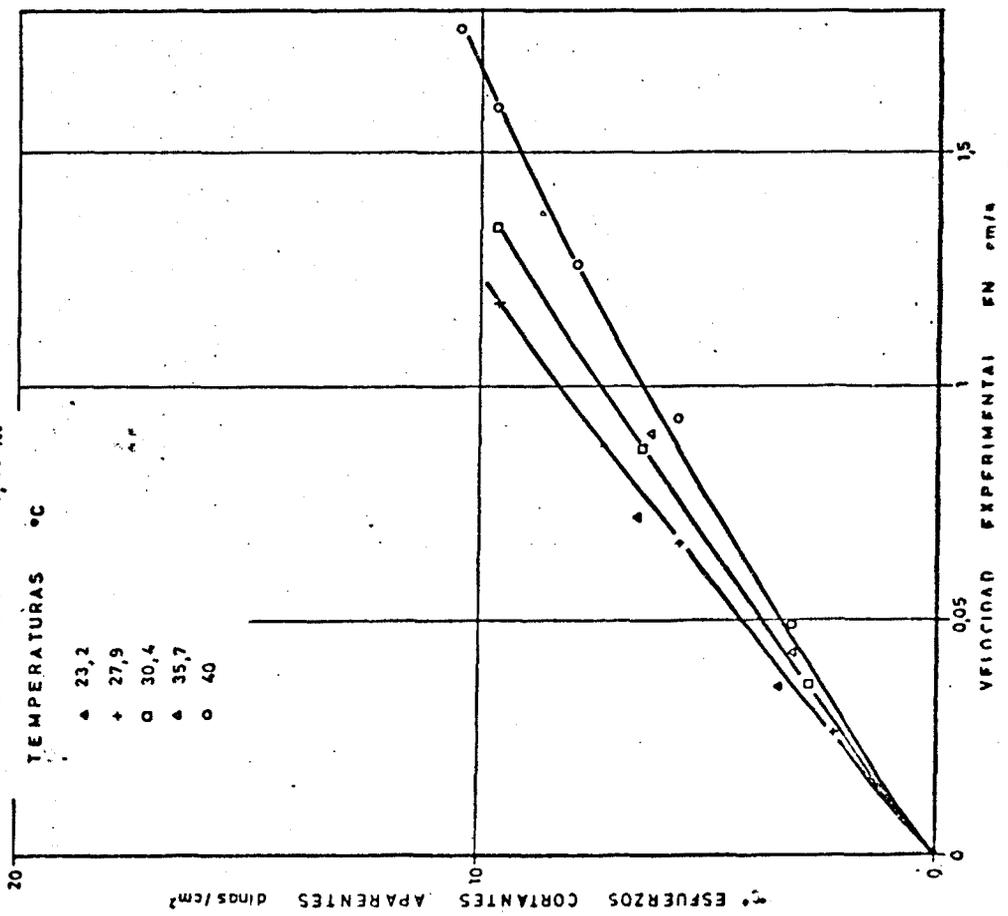
REOGRAMAS APARENTES DE LAS SOLUCIONES
DE C.M.C. EN AGUA
COMPORTAMIENTO SEUDOPLASTICO
TEMPERATURAS °C



FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.26

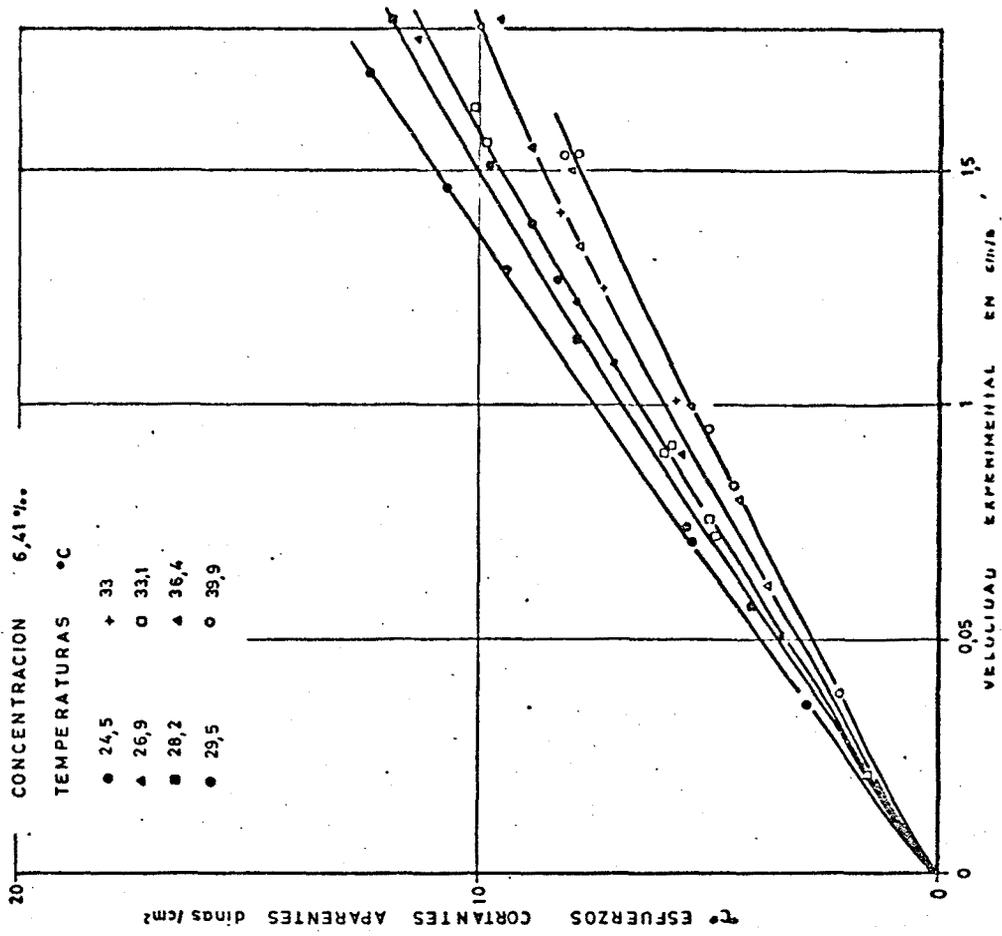
REOGRAMAS APARENTES DE LAS SOLUCIONES
DE C.M.C. EN AGUA
COMPORTAMIENTO SEUDOPLASTICO
CONCENTRACION 7,47%.



FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.27

REOGRAMAS APARENTES DE LAS SOLUCIONES
DE C.M.C. EN AGUA
COMPORTAMIENTO SEUDOPLASTICIDAD
CONCENTRACION 6,41%.



Así, en las figuras 4.28 a 4.33 se visualizan las relaciones gradientes de presiones-velocidades de DARCY experimentales y teóricas. Las figuras 4.34 y 4.35 nos dan las mismas relaciones para un caso concreto, obtenidas encontrando las velocidades a partir de un gradiente de presiones dado o buscando los gradientes de presiones (teórico y experimental) a partir de una velocidad dada.

El comportamiento se manifiesta como si en el medio poroso se produjera una reducción de la permeabilidad, dado que, para una misma velocidad, se produce un gradiente de presiones mayor del previsto por la ley de DARCY generalizada y, lo que es lo mismo, para un gradiente de presiones, la velocidad obtenida es menor que la prevista.

Este fenómeno se encuentra en las experiencias de MASSARANI con goma de adragante y soluciones de Tilosa (variedad C-1000). Los medios porosos homogéneos y consolidados empleados por este autor son de permeabilidades diversas, $9 \cdot 10^{-8}$ y $1,4 \cdot 10^{-6}$ cm^2 para la goma adragante y $1,2 \cdot 10^{-6}$ cm^2 para la Tilosa disuelta, siendo la aquí empleada de $3,055 \cdot 10^{-5}$ cm^2 .

En el estudio de MASSARANI (24) se alcanzan relaciones de velocidad teórica-velocidad experimental que van desde 500 a 200, para la goma de adragante, y velocidades experimentales de 0,02 a 0,07 cm/s., y, para el caso de la Tilosa, de 70 a 11 para velocidades experimentales de 0,01 a 0,12 cm/s., siendo inapreciables para otros fluidos pseudoplásticos.

En este estudio se alcanzan valores máximos del orden de 1,8, empleando velocidades de filtración - hasta de 0,15 cm/s. Estos resultados están de acuerdo - con la apreciación de KOZICKI, para el cual, y debido a fenómenos de deslizamiento en la pared, la ley de DARCY generalizada fácilmente puede dar gradientes de presiones mayores o menores en un 20% a los previstos, según los - fluidos y la geometría empleada (CMC 0,005 a 2,85% en pe so, muchos poros homogéneos y heterogéneos de esferas de vidrio, diámetro de 0,0053 a 0,50 cm. y permeabilidades de 0,522 a $532 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$).

MASSARANI justifica este fenómeno como un - bloqueo de poros debido a posibles fenómenos, cuya interpretación más aceptada, según diversos autores, es la de gelificación o adsorción del fluido alrededor de la partícula sólida.

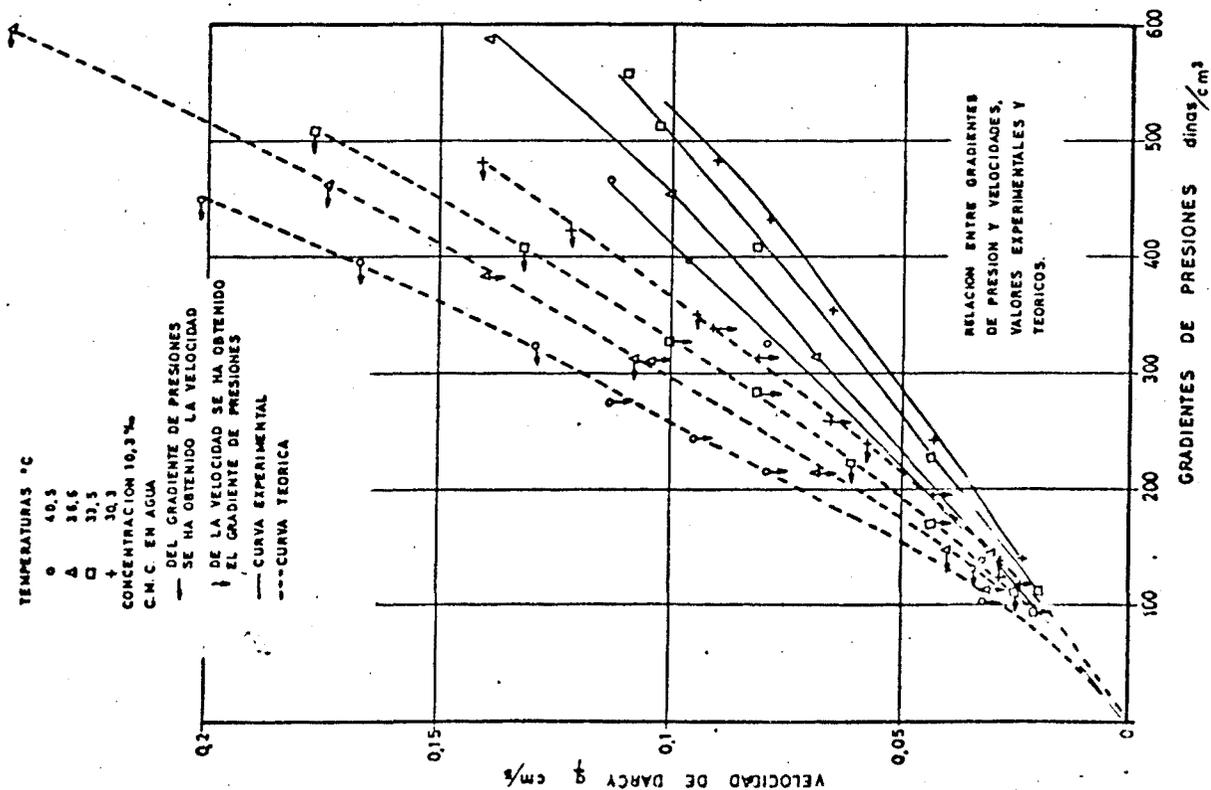
En el estudio del CMC se observa una disminución de la relación de velocidades teórica y experimental con las disminuciones de la velocidad experimental, con el número de REYNOLDS generalizado, con la temperatura y con la concentración (fig. 4.36 a 4.41, 4.42, 4.43) en contra de lo observado por MASSARANI, según el cual - aumenta la relación al disminuir la velocidad experimental, no teniendo datos sobre cambios de temperatura y - concentración y siendo comparables a la evolución cre- ciente de esta relación con el incremento del número de REYNOLDS :

$$Re_K = \frac{\sqrt{k} \cdot q \cdot \rho}{\mu \text{ ef.}}$$

para las soluciones de Natrasol 250 H en un medio poro-

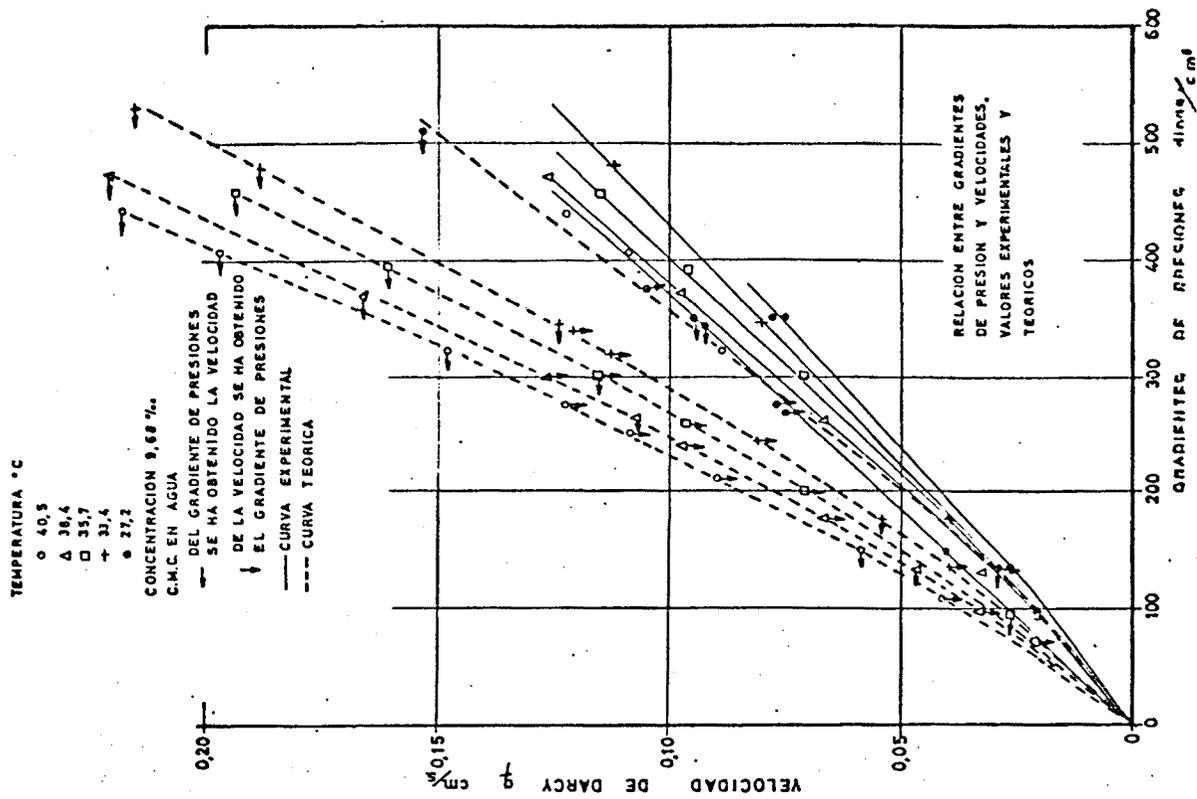
— FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO —
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.28



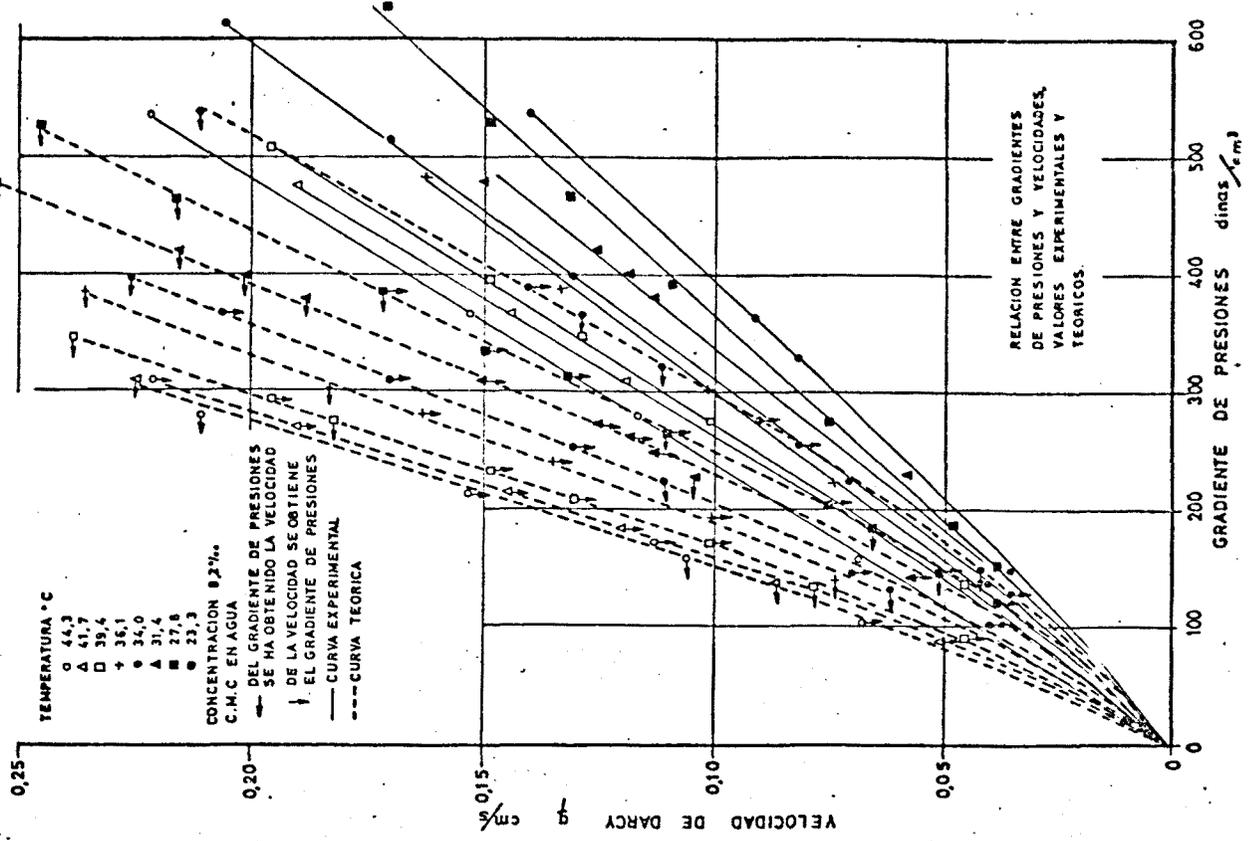
— FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO —
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.29



—FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO—
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.31



—FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO—
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.30

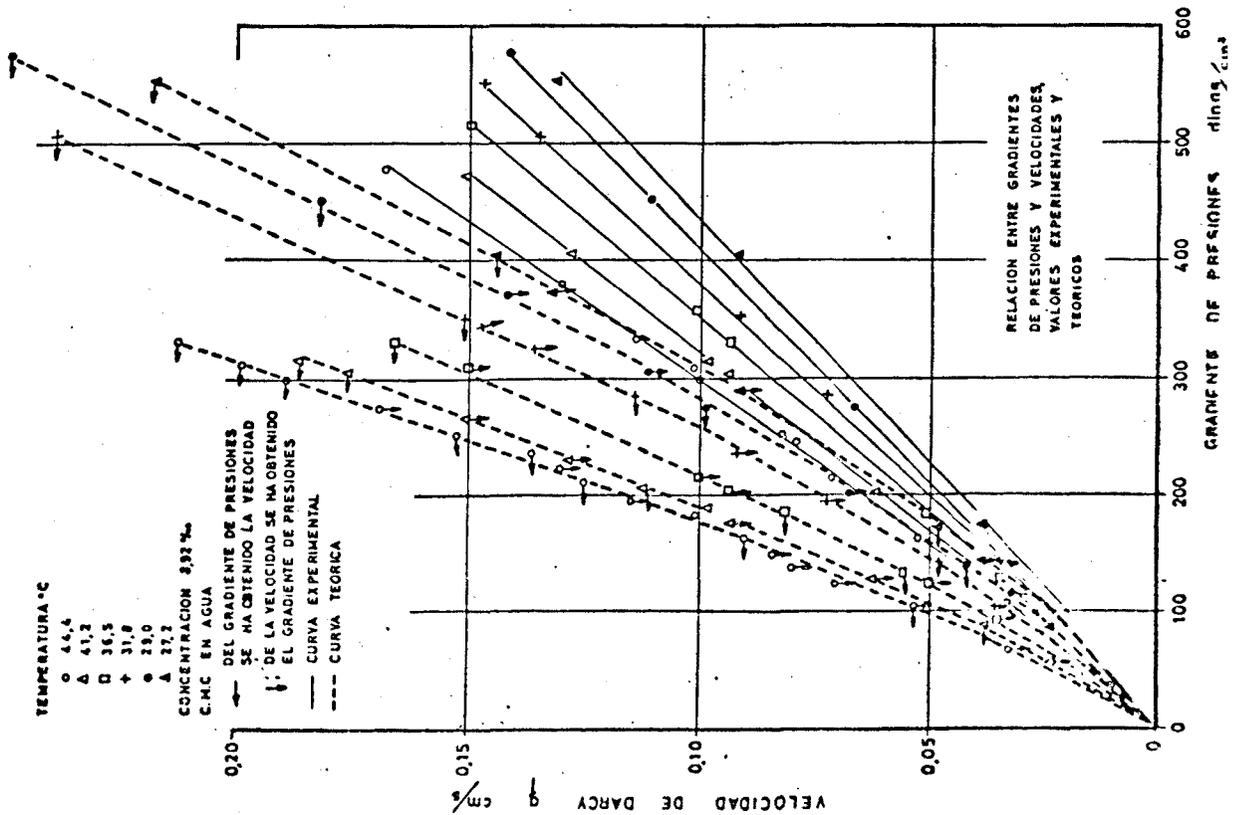


Fig. 4.33
 -- FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO --
 A TRAVES DEL MEDIO POROSO

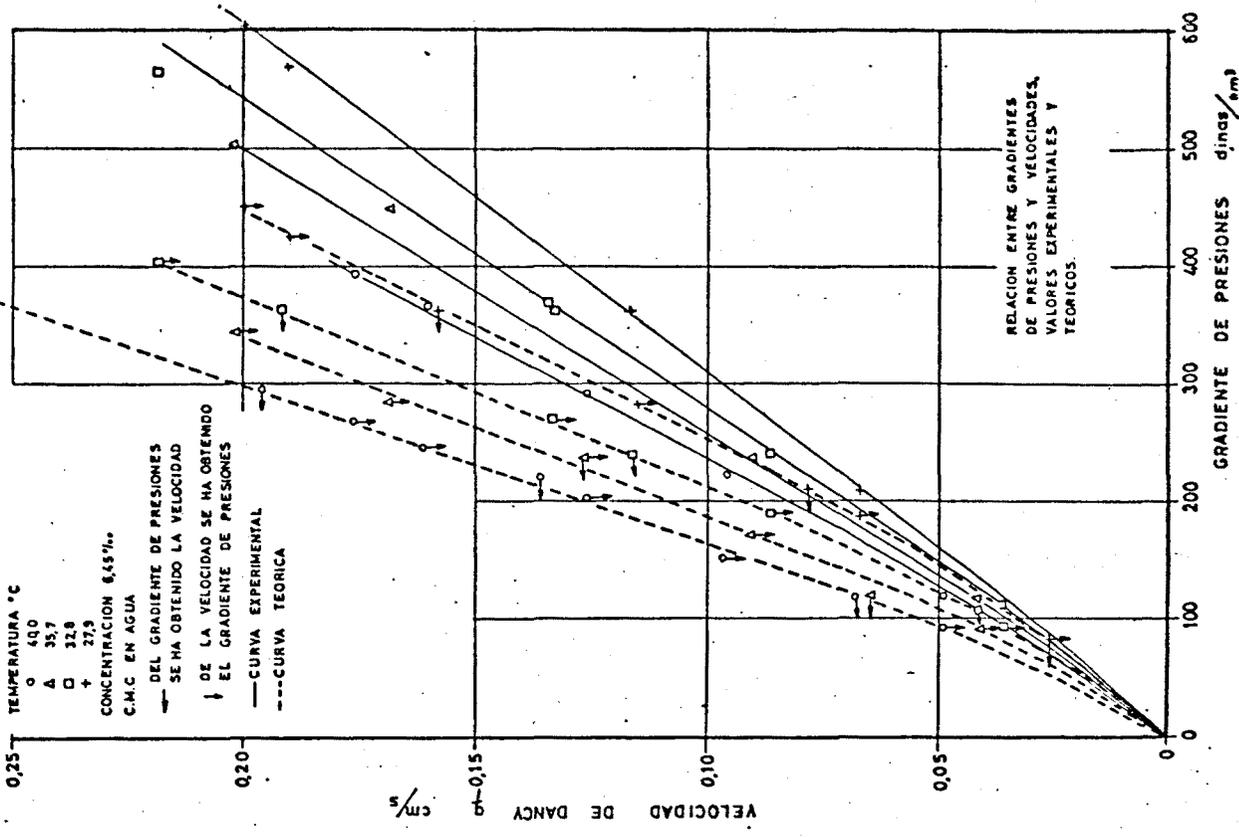
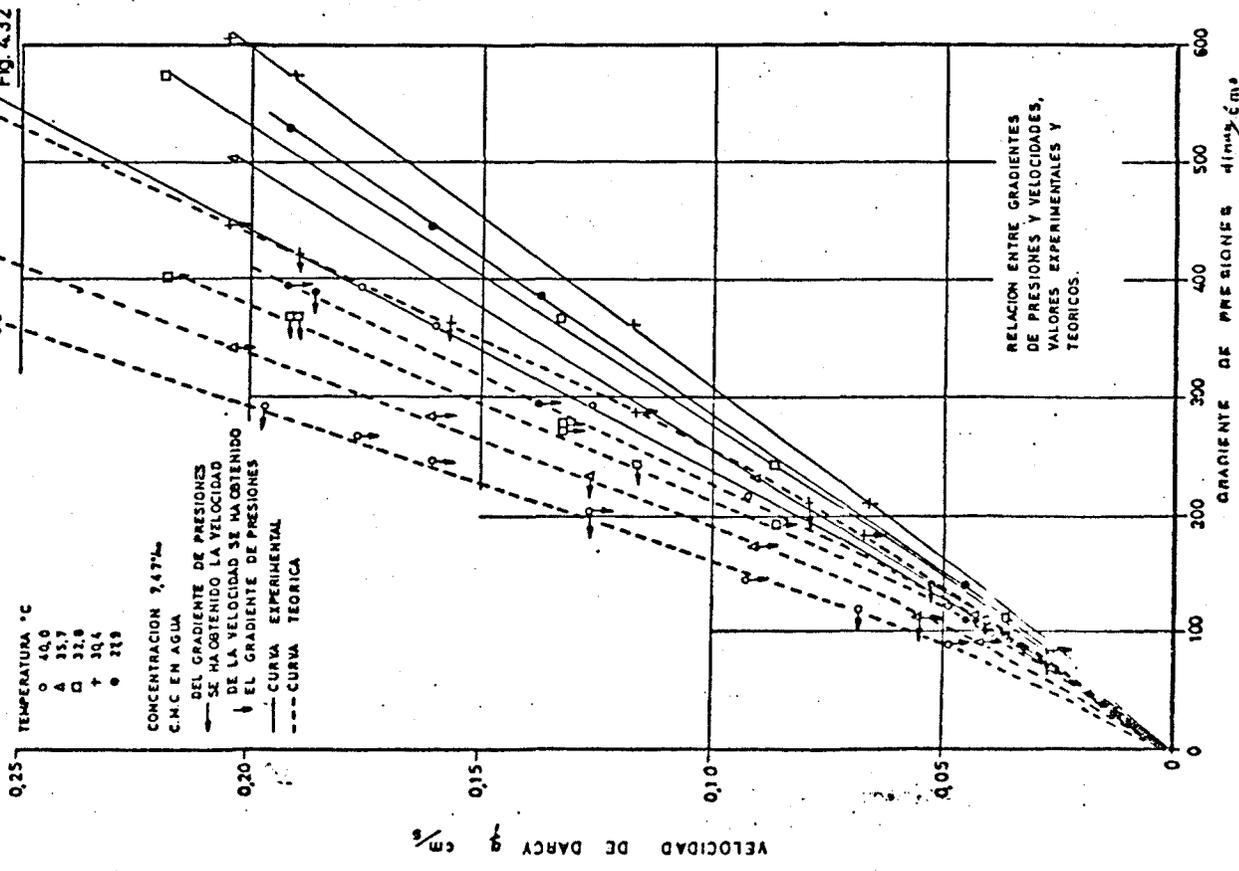


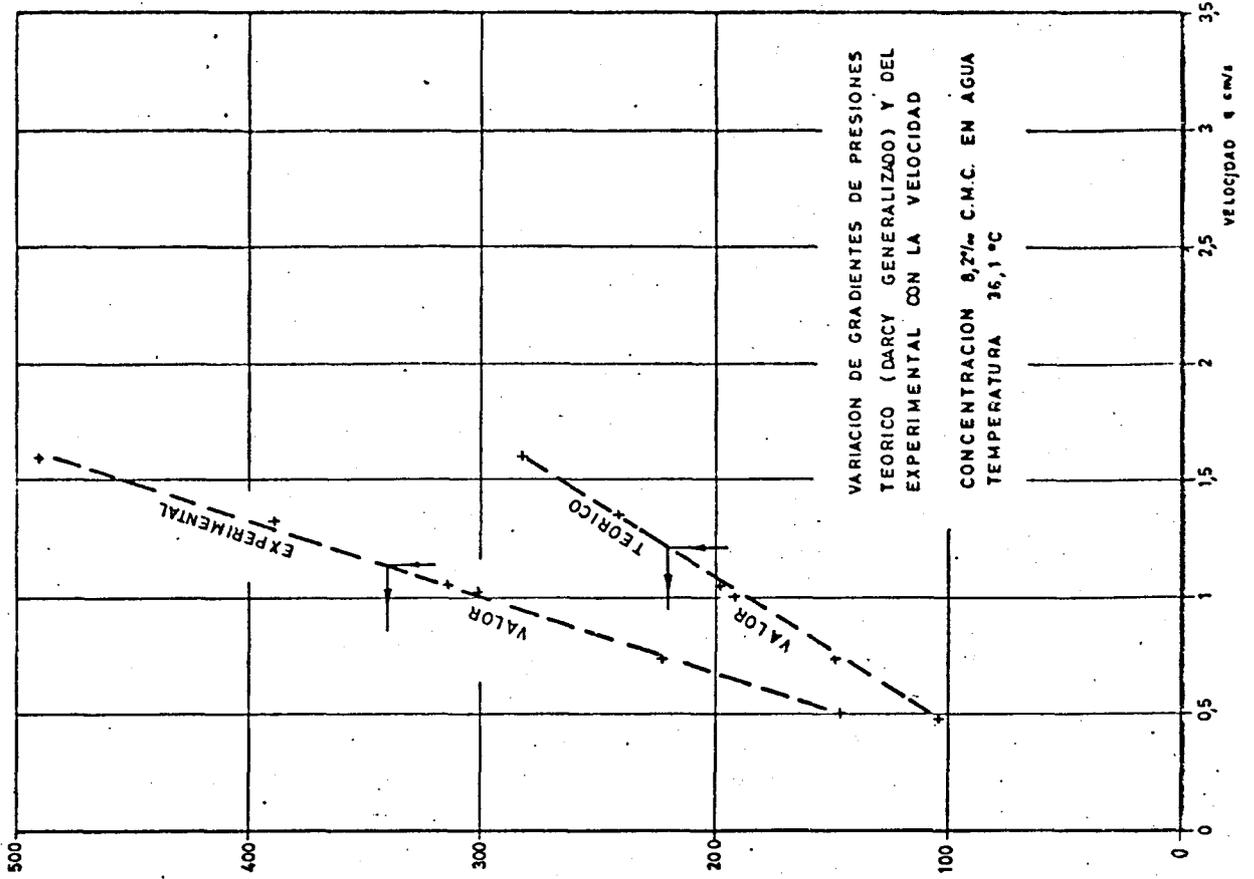
Fig. 4.32
 -- FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO --
 A TRAVES DEL MEDIO POROSO



FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.35

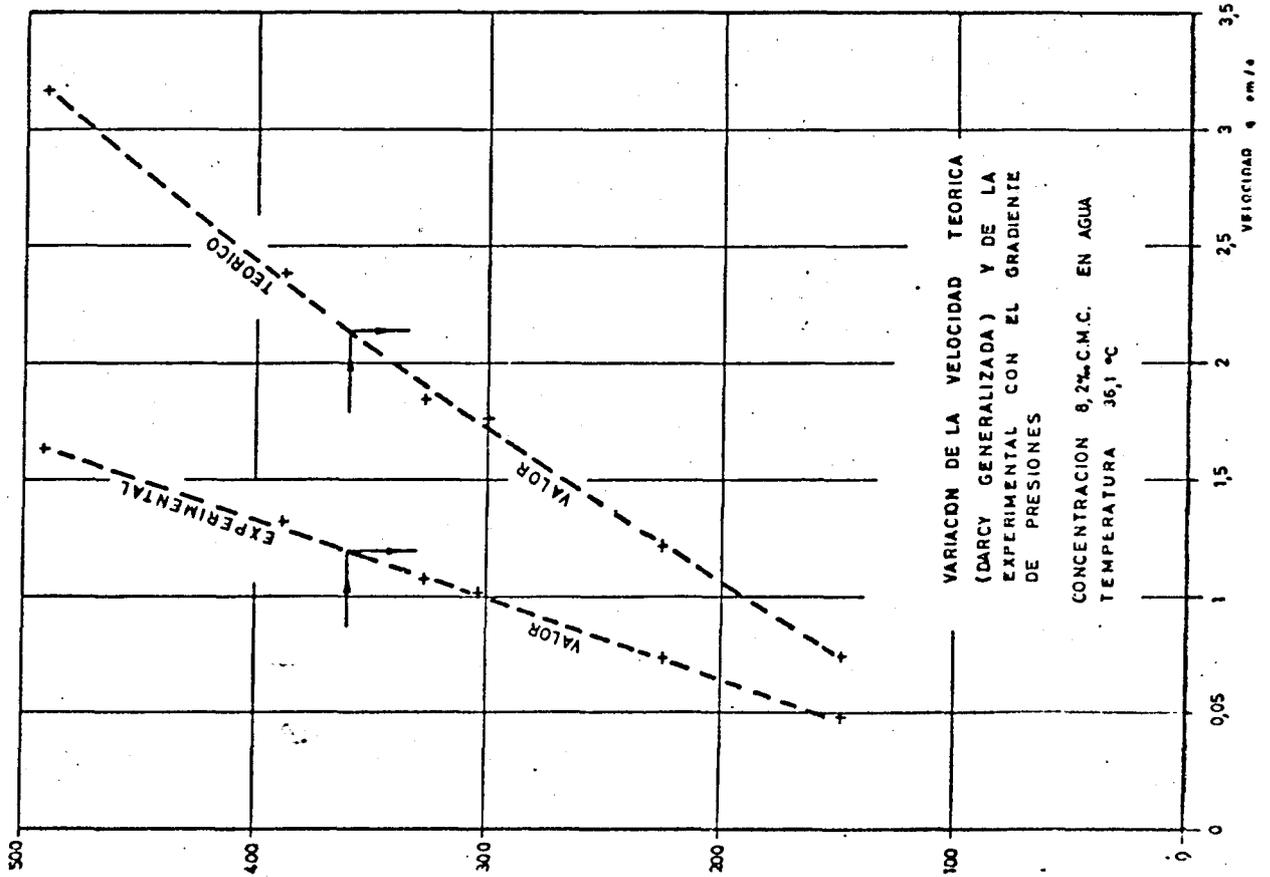
GRADIENTE DE PRESIONES



FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.34

GRADIENTE DE PRESIONES (din/cm²)



so, muy análogo al aquí empleado, pues su permeabilidad era de $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$. En este último caso, la evolución creciente se presenta para Re_K inferiores a 10^{-1} , por lo que no es de suponer la aparición del derrame turbulento.

Fenómenos análogos se citan por SAVINS (7), refiriéndose a trabajos de diversos autores, para fluidos y geometrías diversas (capilar, cilindros coaxiales), entre ellos los de CHU, BURRIDGE y PROWN con soluciones de CMC sódica.

La justificación de este comportamiento, en el derrame a través de un medio poroso, por fenómenos de absorción aparece repetidamente en la literatura (26,41, 44)..

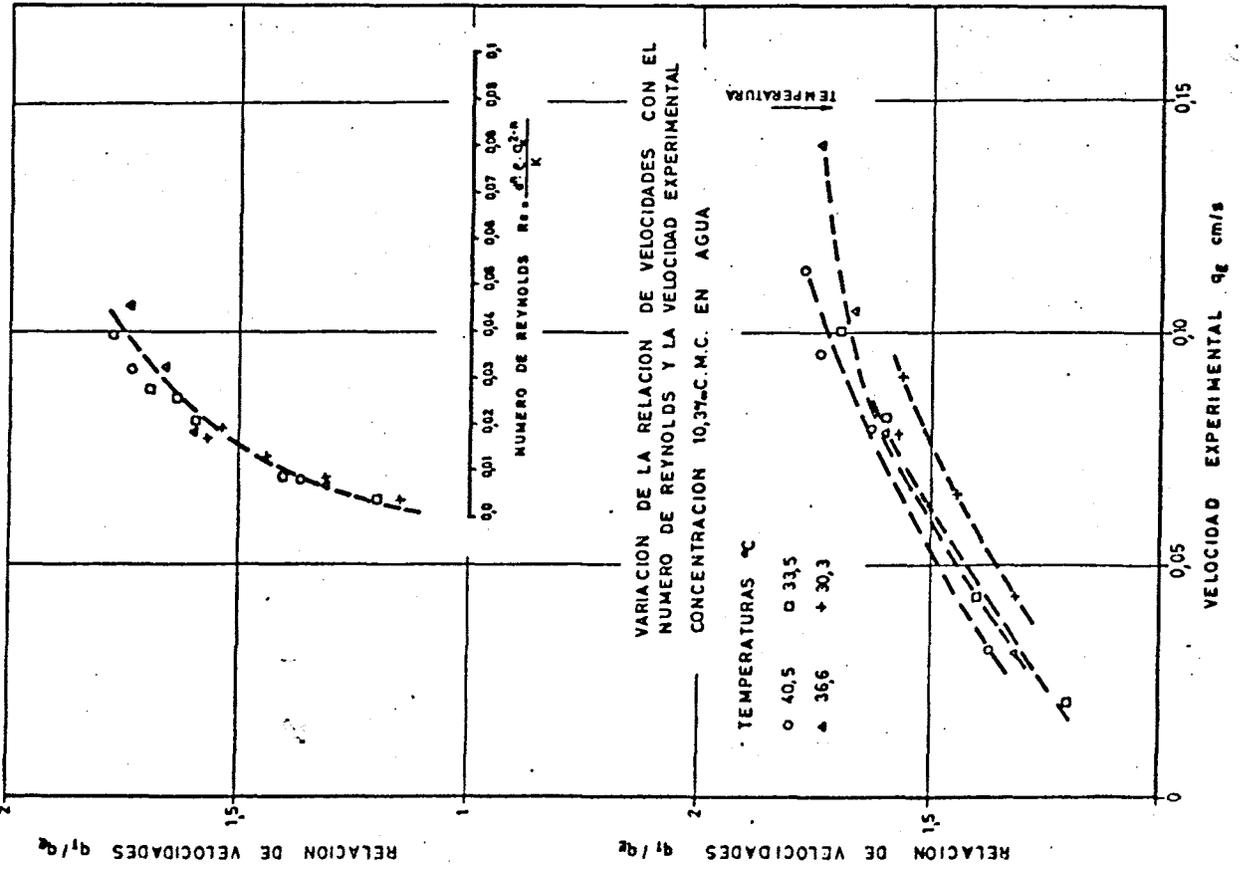
SAVINS (7) cita que es frecuente, en la tecnología del petróleo, encontrar que un fluido, que reométricamente se comporta como seudoplástico, en el medio poroso da una fenomenología dilatante (se refiere a los trabajos de LEE, CLARIDGE y MUNGAR, en los que se observa un retardo en el desplazamiento en las zonas de alta permeabilidad y disminución de las digitaciones, aunque se ha de anotar que el medio es heterogéneo, anisótropo, y el fluido, reométricamente, de comportamiento complejo).

Considerando que se trabajo con un polímero disuelto en un fluido viscoso y que se desplaza en una geometría complicada, los fenómenos que pueden intervenir son, á nivel macroscópico y microscópico

- a) - Asociación molecular a gran escala.
- b) - Puentes de hidrógeno.

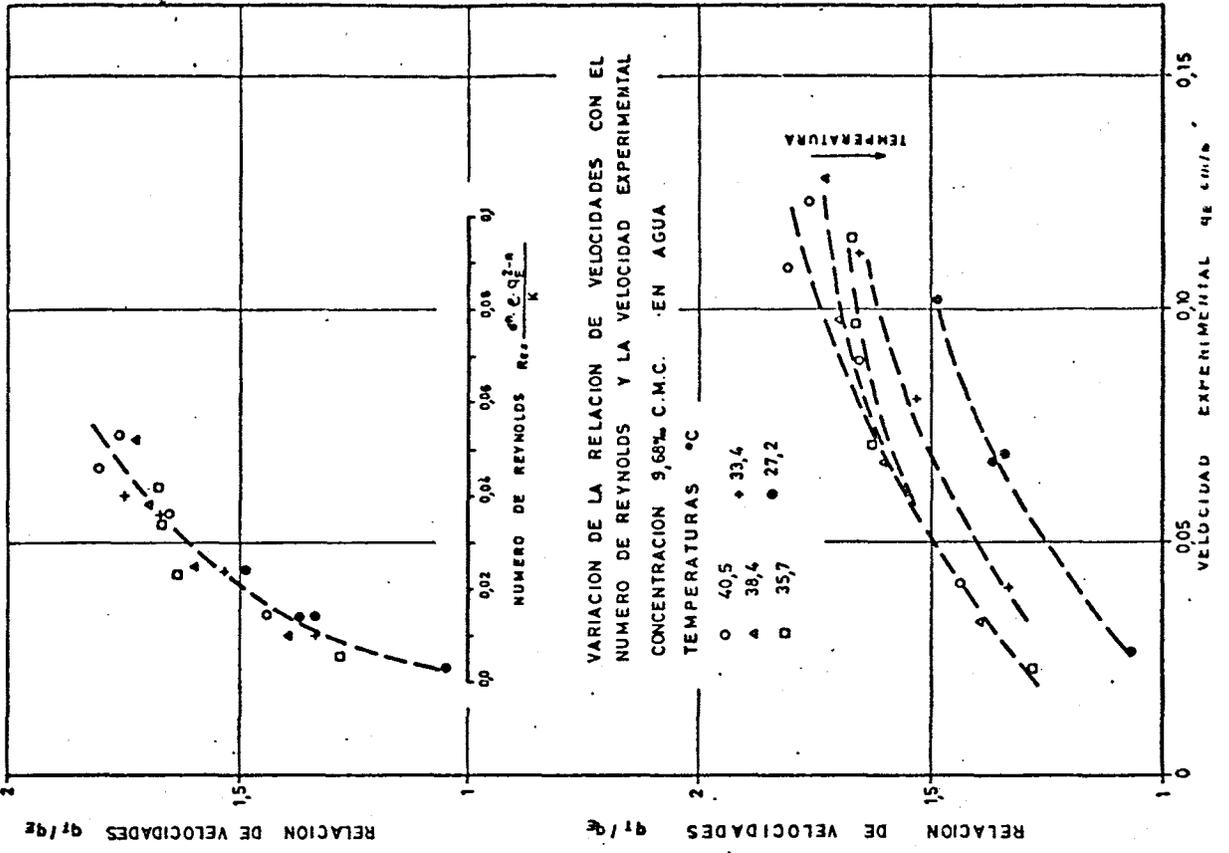
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4. 36



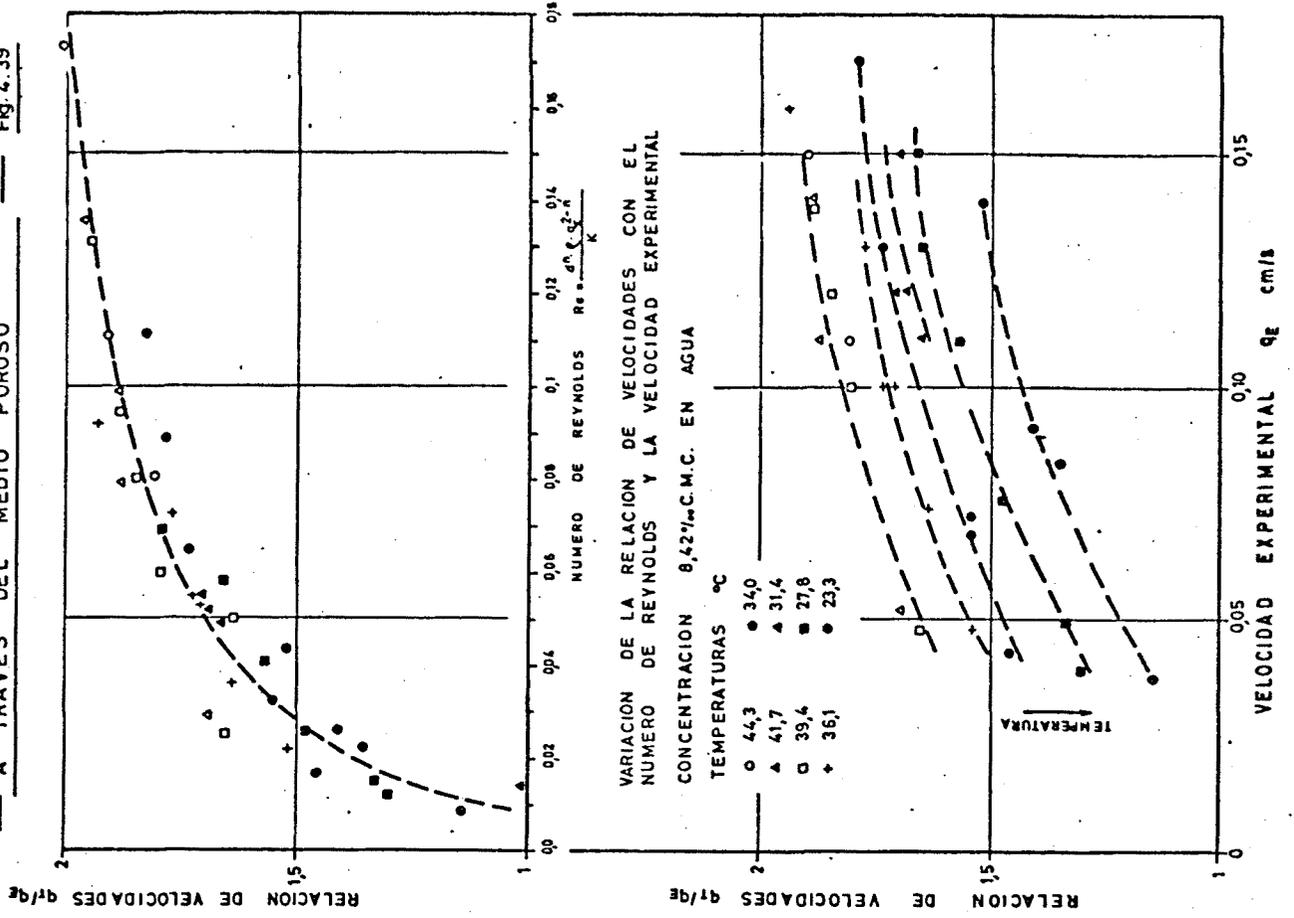
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4. 37



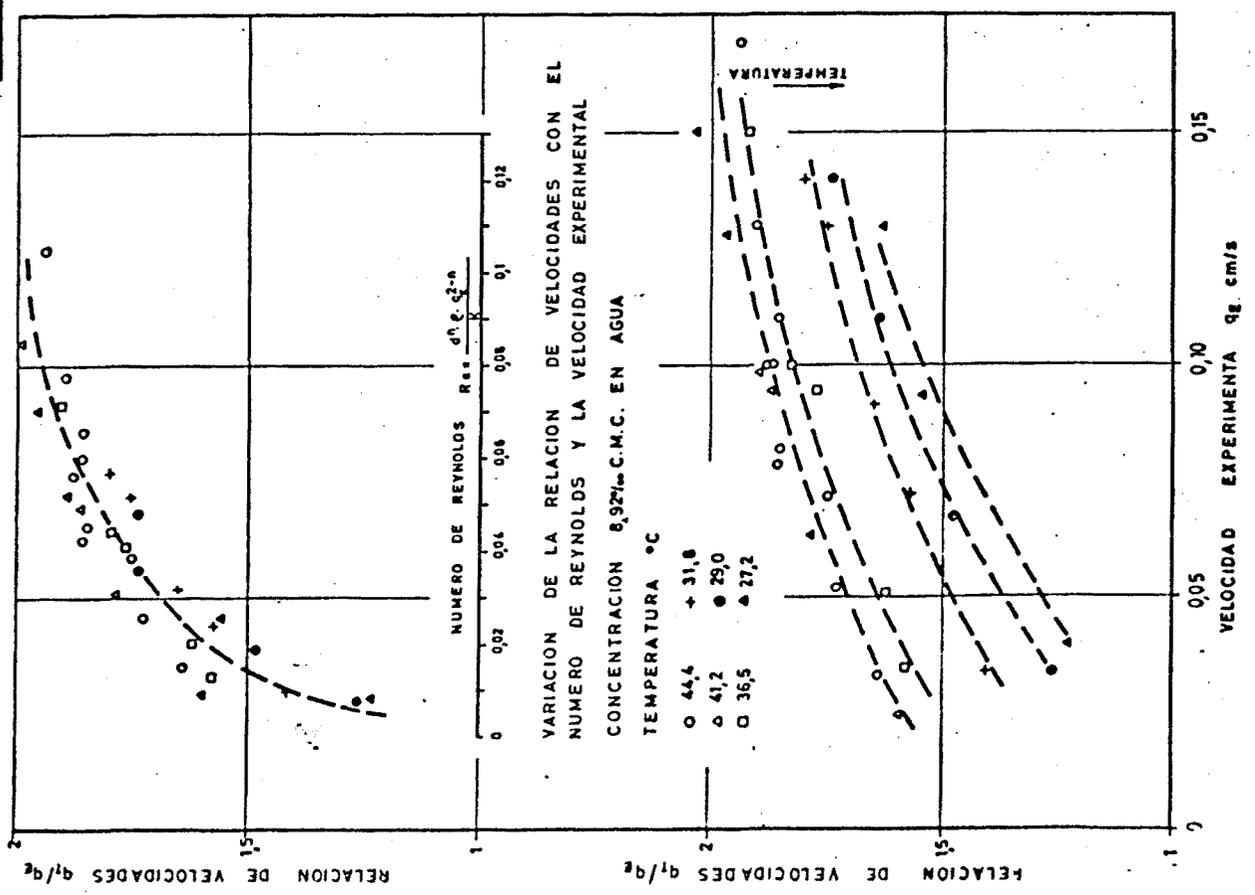
FLUJO DE UN FLUIDO NO-NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.39



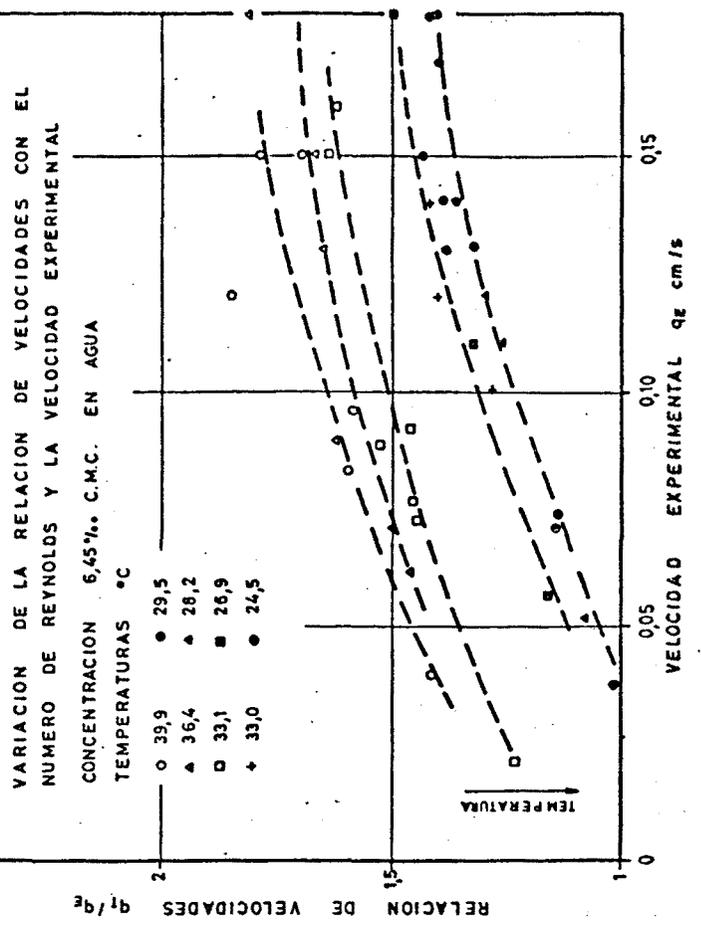
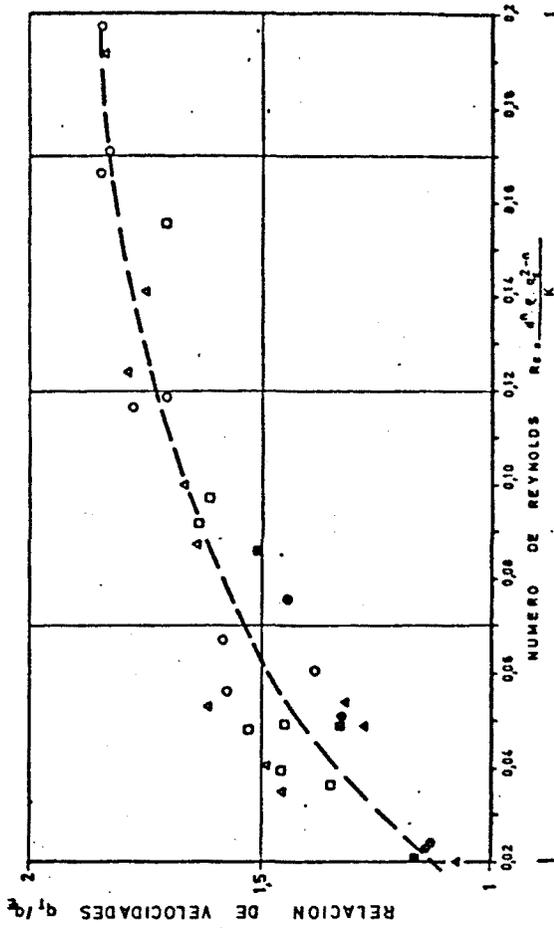
FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.38



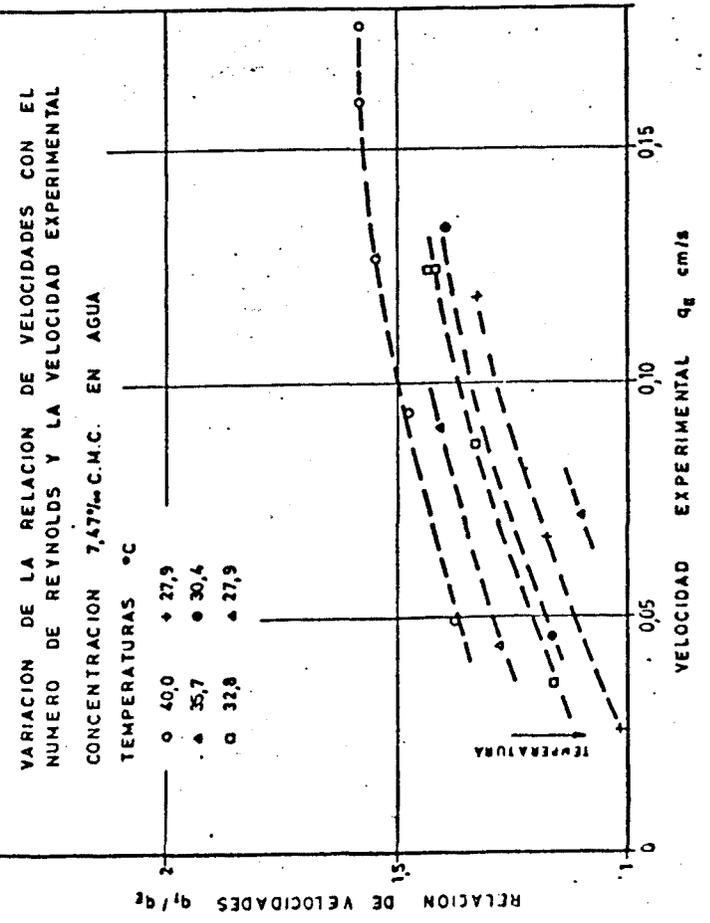
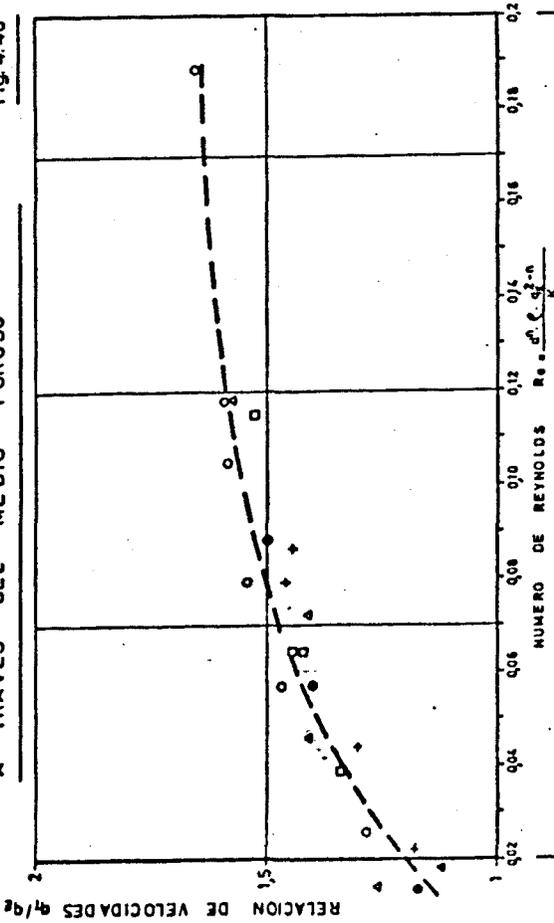
FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.41



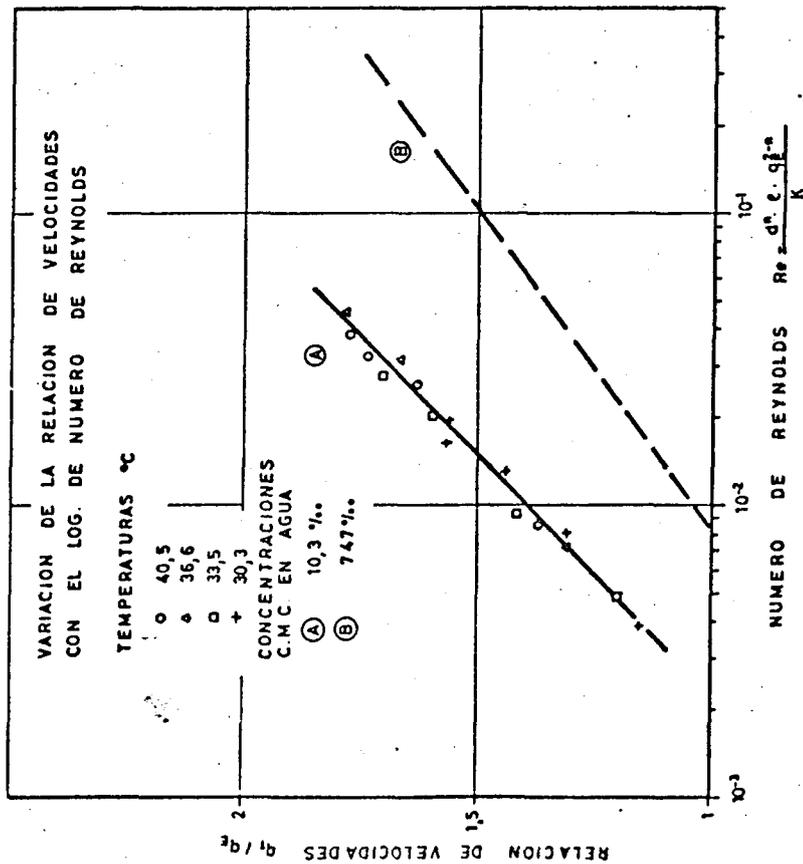
FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.40



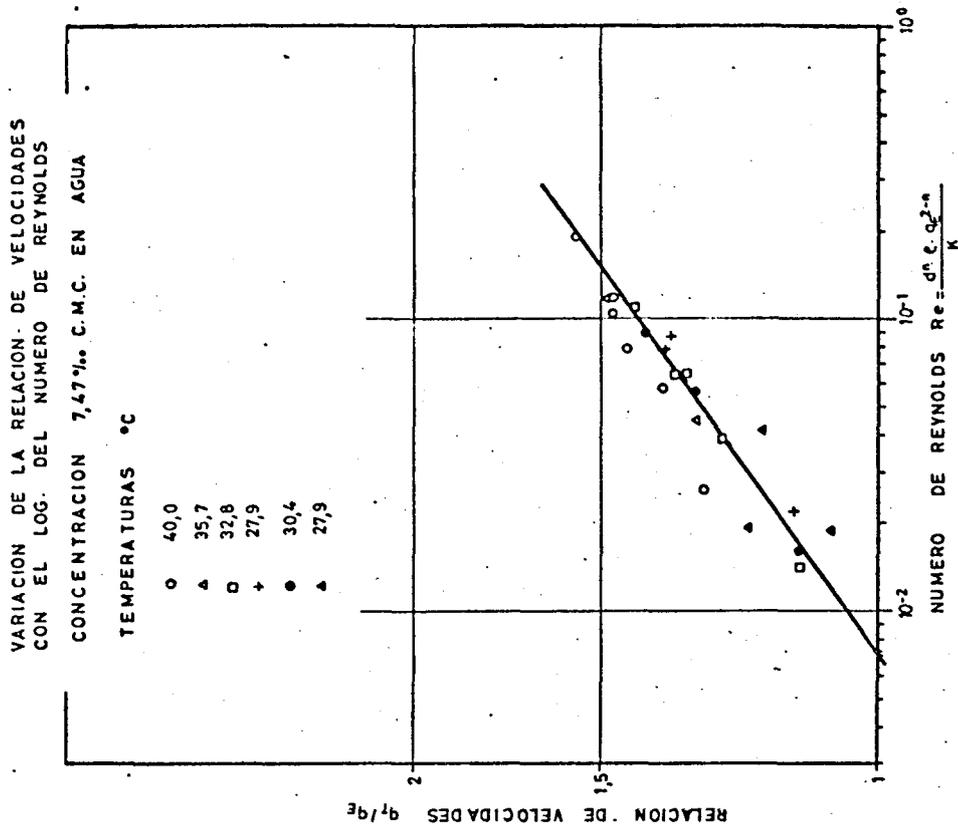
FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.42



FLUJO DE UN FLUIDO NO - NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.43



- c) - Cadenas sinuesas o no, que presentan interacción molecular.
- d) - Formación de zonas hidrofóbicas.
- e) - Formación de estructuras microcristalinas.
- f) - Formación de enlaces inter e intra molecular.
- g) - Formación de unidades reológicas en función del gradiente de velocidades.
- h) - Falta de lubricación entre las moléculas del polímero.
- i) - Comportamiento no lineal de las formas sólidas o moleculares disueltas (deformación molecular elástica en los poros estrechos).
- j) - Obstrucción de los poros estrechos por las moléculas.
- k) - Orbita o desplazamiento de las partículas o macromoléculas.
- l) - Interacciones con la pared.
- m) - Derrame complejo, con fuertes cambios de energía cinética al pasar de las partes anchas a las estrechas de los poros (formación de remolinos).

Los fenómenos enunciados en a,b,c,e,f, escapan a la extensión de este estudio de tipo mecánico, aunque nos parecen factibles por la ionización que presentan las soluciones de CMC, ionización que ha llegado a alterar el control de distancia cono-plato en el reoviscosímetro FERRANTI. Diversos autores las han estudiado - (7,20).

THIRRIOT justifica la existencia de la causa d) en las soluciones de CMC por la birrefringencia que éstas presentan. Las macromoléculas apiladas encierran el agua, produciéndose un fenómeno de "valculeo" al deformarse estos paquetes. Este sería el origen de trabajos de frotamiento muy grandes y de existencia de un medio poroso en el interior de otro, ambos con escalas de tiempos diferentes. Esta fenomenología nos llevaría a un comportamiento viscoelástico, en el cual los tiempos de relajación del fluido discreparían del de tránsito entre una contracción y expansión del medio poroso y el de un paquete de macromoléculas (3,23,30,7,46). En caso de que los tiempos de relajación fueran grandes respecto a los de tránsito, los fenómenos viscoelásticos serían acusados y debería utilizarse en el estudio el número de DEBORAH.

$$D_e = \frac{\theta f}{0 p}$$

Posiblemente este fenómeno se manifieste a escala microscópica, pues en la caracterización macroscópica no se ha puesto en evidencia dado que el tiempo de tránsito de la partícula entre dos cavidades, conexas por un poro, es del orden del segundo, por lo que nos encontramos frente a un ensayo de reometría con tiempos de relajación y parada experimentales más reducidos que los alcanzables por ningún instrumento de caracterización de laboratorio existente en el mercado.

El fenómeno indicado en el apartado i) se relaciona con el d) si tenemos en cuenta que los gradientes de velocidad son importantes en los poros estrechos y po

drán afectar a la molécula dando un tensor esfuerzos modificado. (Si comparamos el esfuerzo constante medio calculado para la concentración 10,3 % a una temperatura de 30,3 °C, se encuentra un gradiente de velocidades medio máximo del orden de 33 s^{-1} y, para la concentración 8,2% a 44,3 °C, se obtiene $8,700 \text{ s}^{-1}$, lo que nos muestra la variabilidad del gradiente de velocidades que es de esperar sea mucho mayor localmente).

El derrame a través de un medio poroso es análogo a un derrame pulsatorio, desde el punto de vista de evolución de las presiones locales y acciones sobre el polímero, y es bien conocida la importancia de las fuerzas elásticas en este tipo de derrame, aunque, macroscópicamente, el régimen es no estacionario, para un sistema de Lagrange, y estacionario para uno euleriano.

El fenómeno j) nos parece muy poco probable, por la gran diferencia de los órdenes de magnitud del tamaño del poro y de la macromolécula o paquete de moléculas.

Las causas h), k) y l) se encuentran muy relacionadas por diversas consideraciones. En el seno del fluido se produce una distribución de velocidades y de esfuerzos cortantes que origina sobre la partícula en "suspensión", en este caso macromolécula, (efecto MAGNUS) una "órbita) preferida o deriva, que se manifiesta en una emigración radial hacia la pared o hacia el eje del conducto (SAVINS cita los trabajos de BARNES, GOLDSMITH Y MASSON al respecto, observándose el fenómeno para suspensión de esferas rígidas o bajos números de REYNOLDS del orden de 10^{-4}).

OLDROYD indica que posiblemente la pared - oriente también las moléculas, creando una anisotropía - en el flujo, ya de por sí anisótropo por la geometría im puesta (anisotropía que interfiere los cambios de variaciones espacial de la velocidad).

Ambas causas pueden desembocar en g), una - vez formuladas las unidades reológicas, producirse los - fenómenos citados con anterioridad.

El fenómeno g) es equivalente al d) y, a escala macroscópica, análogo a la formación de discontinuidades observadas en la pasta de papel, en función de la agitación y condiciones de contorno que pueden imponer - una ordenación o desordenación a las fibras. Las acciones hidrodinámicas, en el medio poroso, pueden favorecer la formación de ovillos de macromoléculas, en los cuales se presenta una sección recta media más importante que la - de la cadena macromolecular aislada.

Esta anisotropía en el fluido es clásica en los trabajos de reoviscosimetría (SCOTT-BLAIR, MOONEY, - OLDROYD, STOKES, ERICSEN) y viene del hecho de que el - fluido no newtoniano tenga un comportamiento relacionado con las dimensiones del canal que lo encierra. El fenómeno se conoce como efecto pared. El efecto es positivo si la capa de la pared tiene una deficiencia de soluto, y - negativo cuando el soluto es absorbido por el sólido - (fig. 4.44) (flujo pistón de un fluido de carácter plástico).

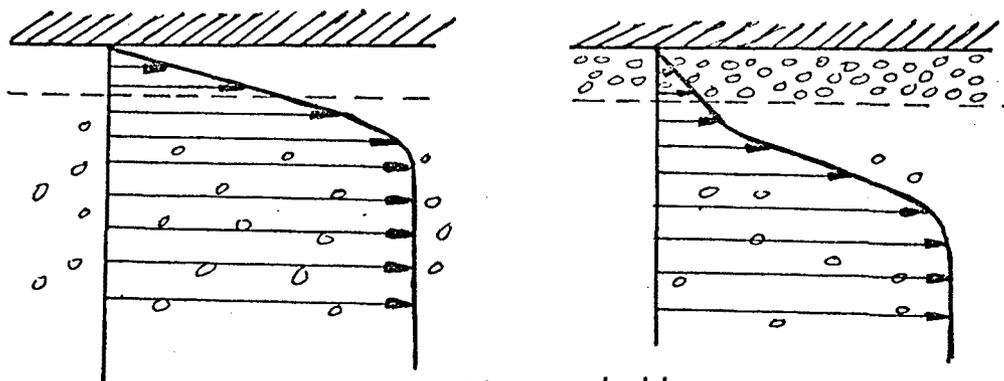


Figura 4.44.

Así, en la expresión :

$$\frac{v - v_S}{R} = \frac{1}{r_p^3} \int_{\epsilon}^{r_p} r^2 f(r) dr$$

siendo v_S la velocidad de deslizamiento, que puede tomar valores diferentes según sea la viscosidad en la capa de la pared inferior o superior a la del resto del fluido y, por lo tanto, modificar el comportamiento reológico del fluido.

Es de especial interés el fenómeno enunciado en m). El derrame, en conjunto, presenta un número de REYNOLDS muy bajo, lo que hace que se considere laminar. Localmente el valor de éste puede modificarse sensiblemente debido a poros estrechos, modificación de la "viscosidad" local por causa de la anisotropía u otra razón, dando lugar a vorticidad y regímenes turbulentos locales. (THIRRIOT indica que la relación de velocidades puede fácilmente variar de 1 a 100).

Toda esta fenomenología expuesta modifica las hipótesis enunciadas en 4.1 para establecer la ley de DARCY.

Por la evolución, observada en las figuras - 4,36 a 4.41, de la relación de velocidades con el número de REYNOLDS, la velocidad experimental y la concentración, se deduce que el fenómeno es función :

- 1) - del número de REYNOLDS.
- 2) - del carácter pseudoplástico del fluido.

Así, al crecer la temperatura y al crecer la velocidad experimental, es decir el número de REYNOLDS - medio, la relación de velocidades crece, lo que hace suponer la aparición de turbulencias locales.

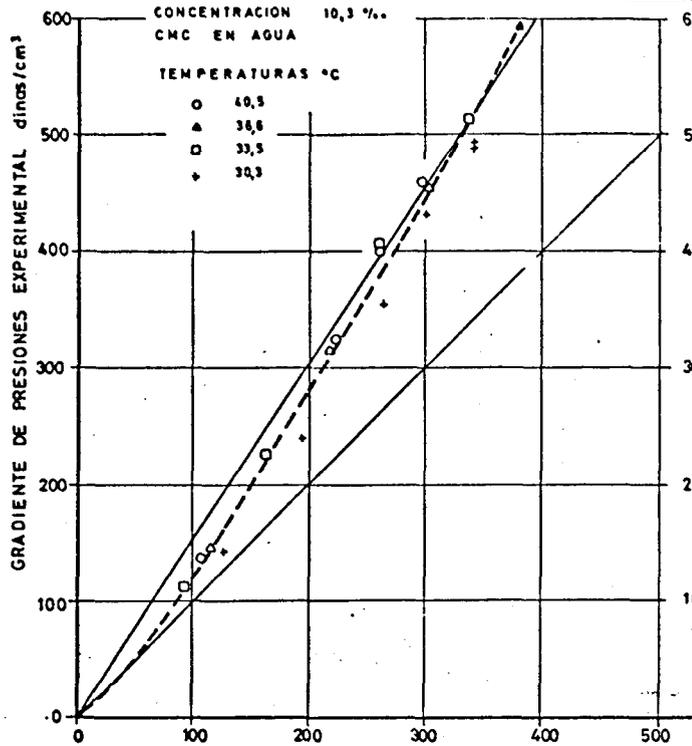
En las mismas figuras y en las 4.42 y 4.43 - se observa una evolución más rápida del alejamiento de - la ley de DARCY generalizada, cuanto mayor es la concentración del soluto CMC, contrariamente a que un aumento de concentración implica una mayor "viscosidad" y, por lo tanto, un número de REYNOLDS menor y menos turbulencias locales.

En este caso, posiblemente el fluido está más cargado de macromoléculas, y la aparición de anisotropía en su interior es más rápida (efecto pared y otros).

Los dos fenómenos : variación de la concentración, y de anisotropía, y variación del número de REYNOLDS local, son de evolución antagónica, aunque actúan en el mismo sentido en el comportamiento general del fluido, - pudiendo aunarse a otros no puestos en evidencia en este estudio.

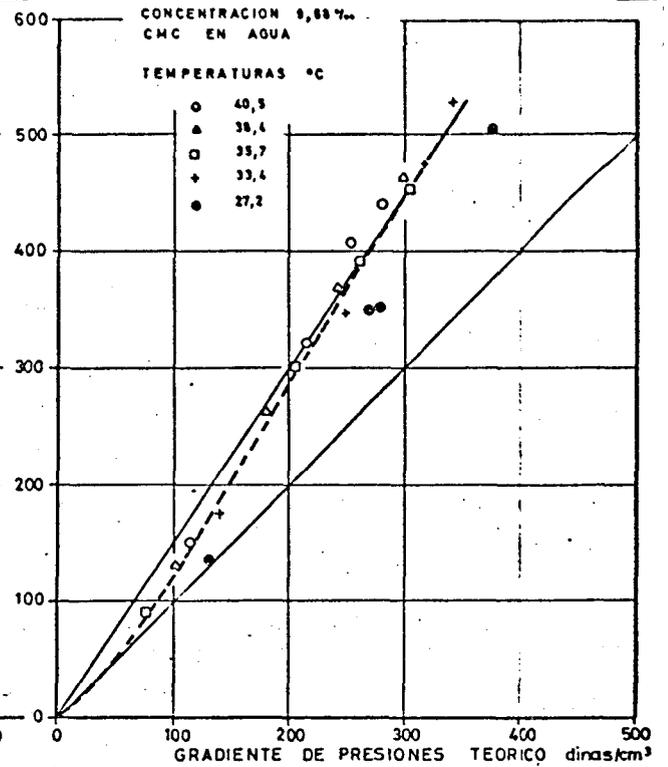
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.46



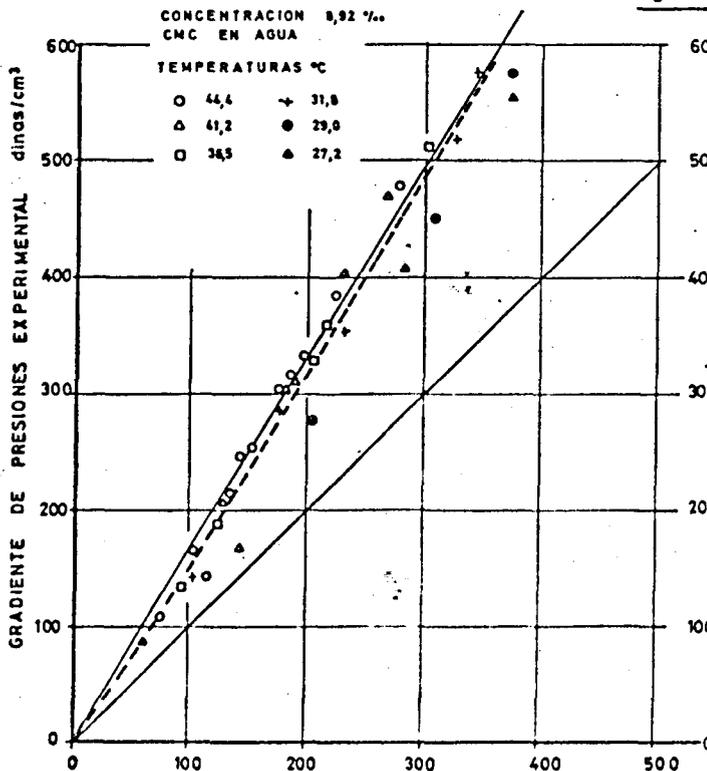
RELACION ENTRE LOS GRADIENTES DE
PRESION TEORICOS Y EXPERIMENTALES

Fig. 4.47



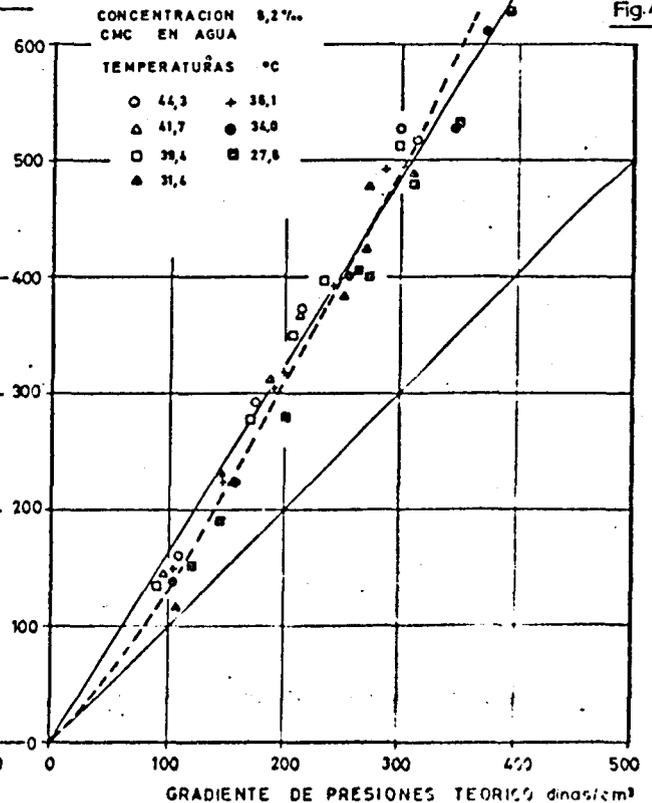
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.48



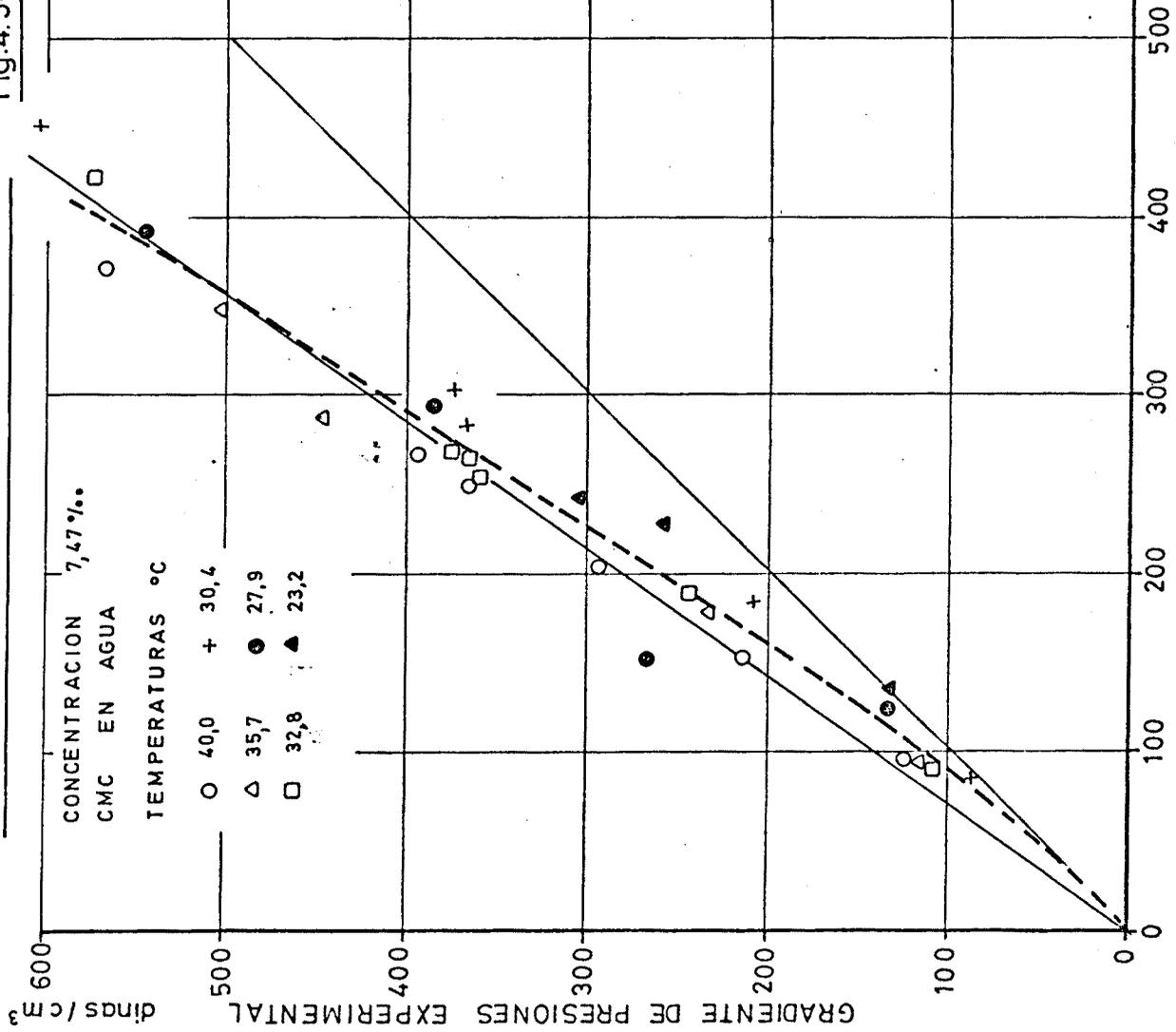
RELACION ENTRE LOS GRADIENTES
DE PRESION TEORICOS Y EXPERIMENTALES

Fig. 4.49



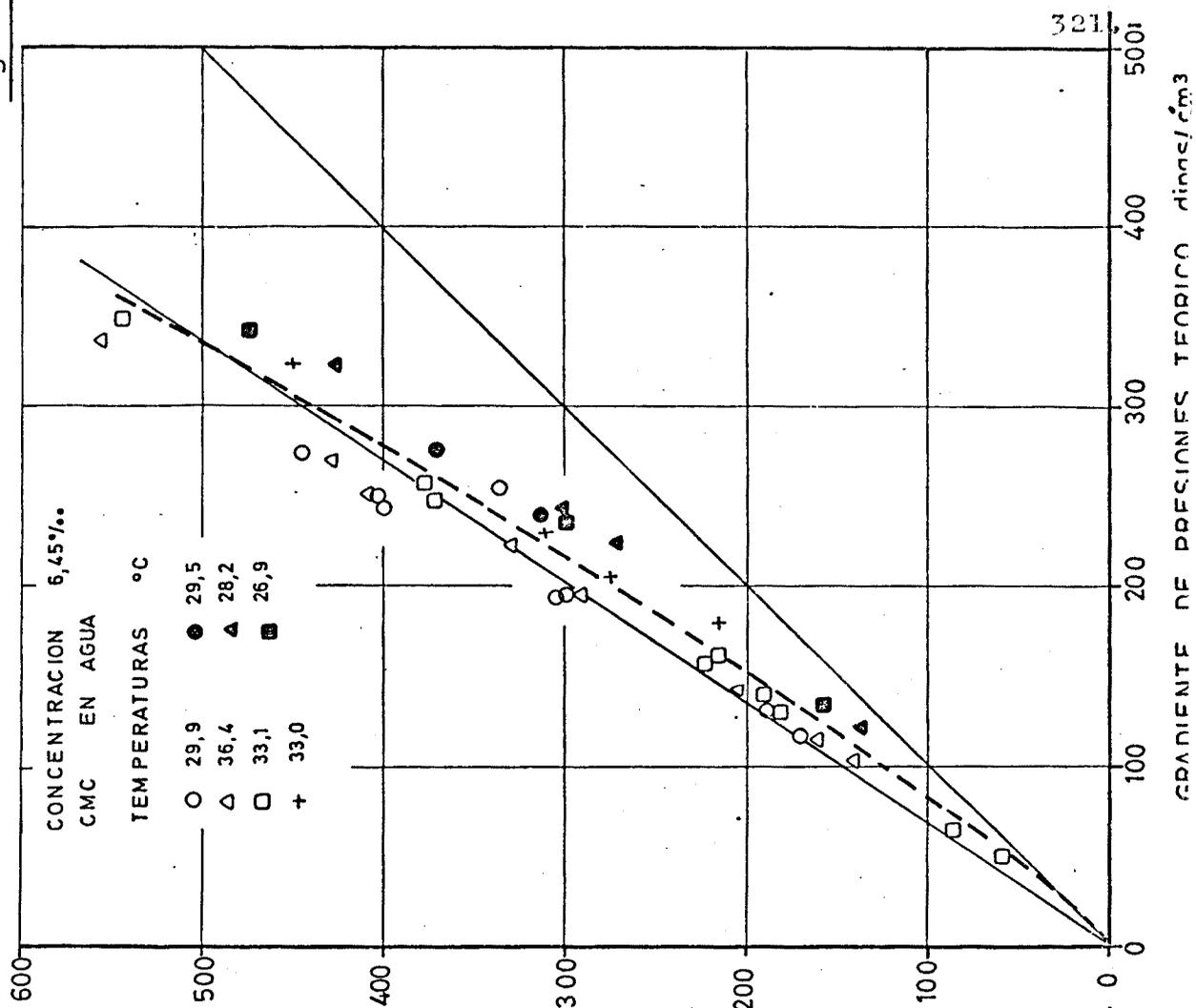
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

— A TRAVES DEL MEDIO POROSO — Fig.4.50



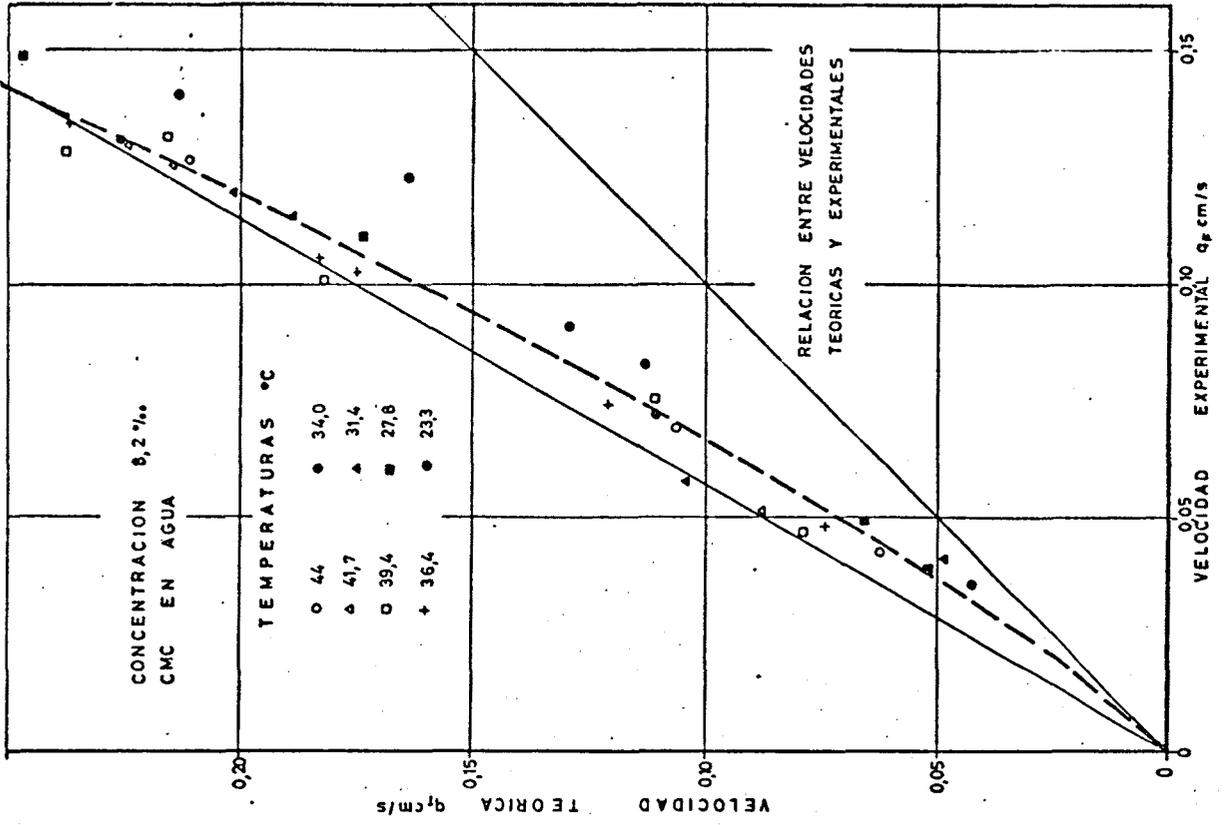
RELACION ENTRE GRADIENTES DE
PRESION TEORICOS Y EXPERIMENTALES

Fig.4.51



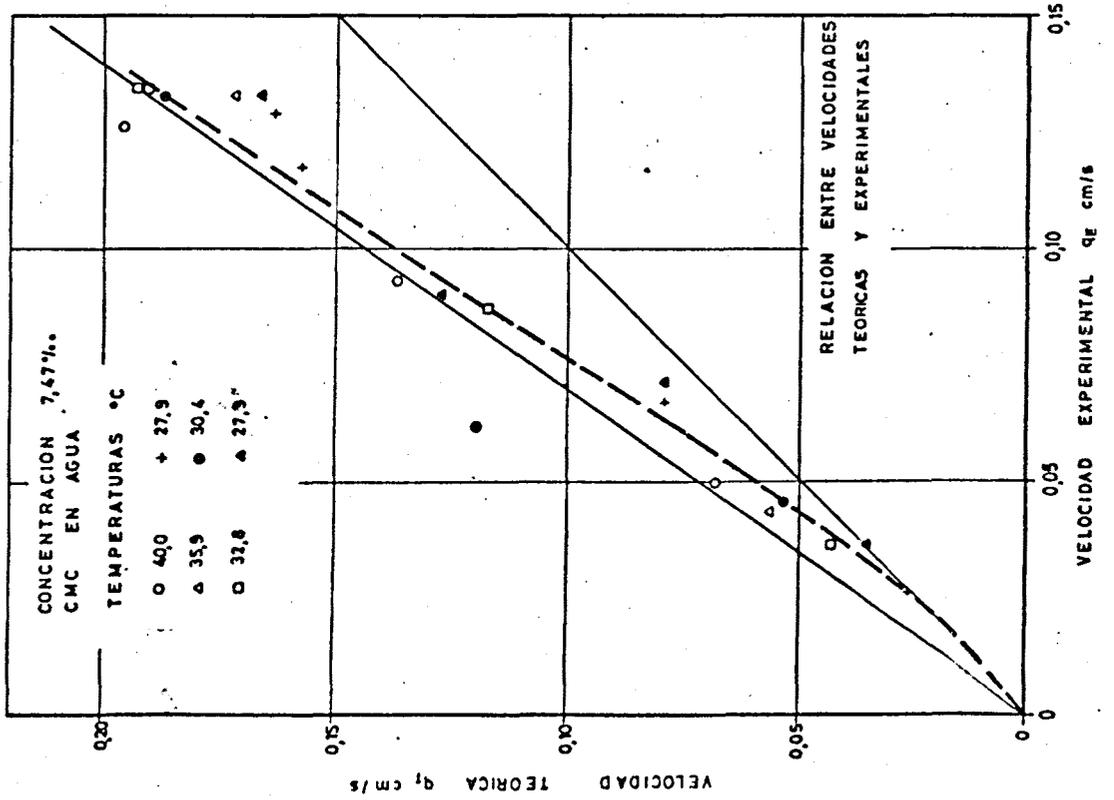
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.53



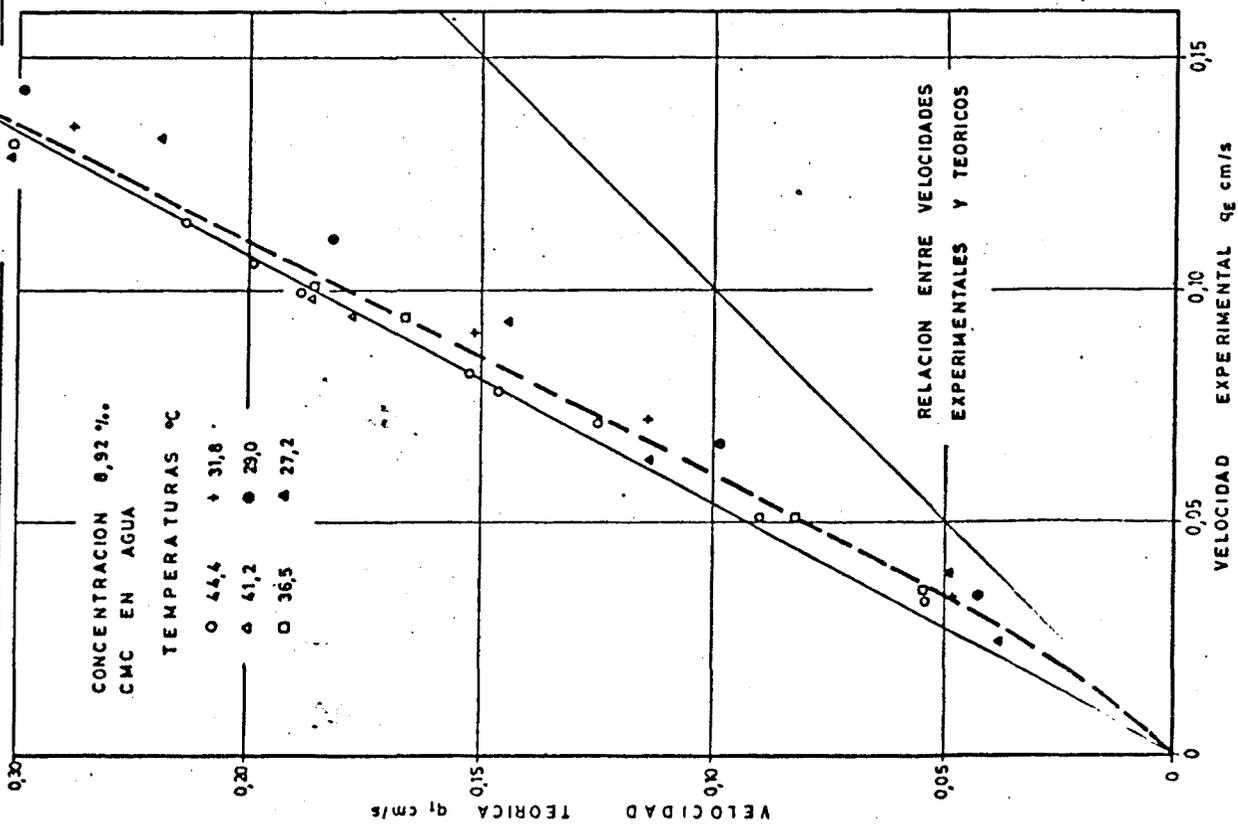
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.52



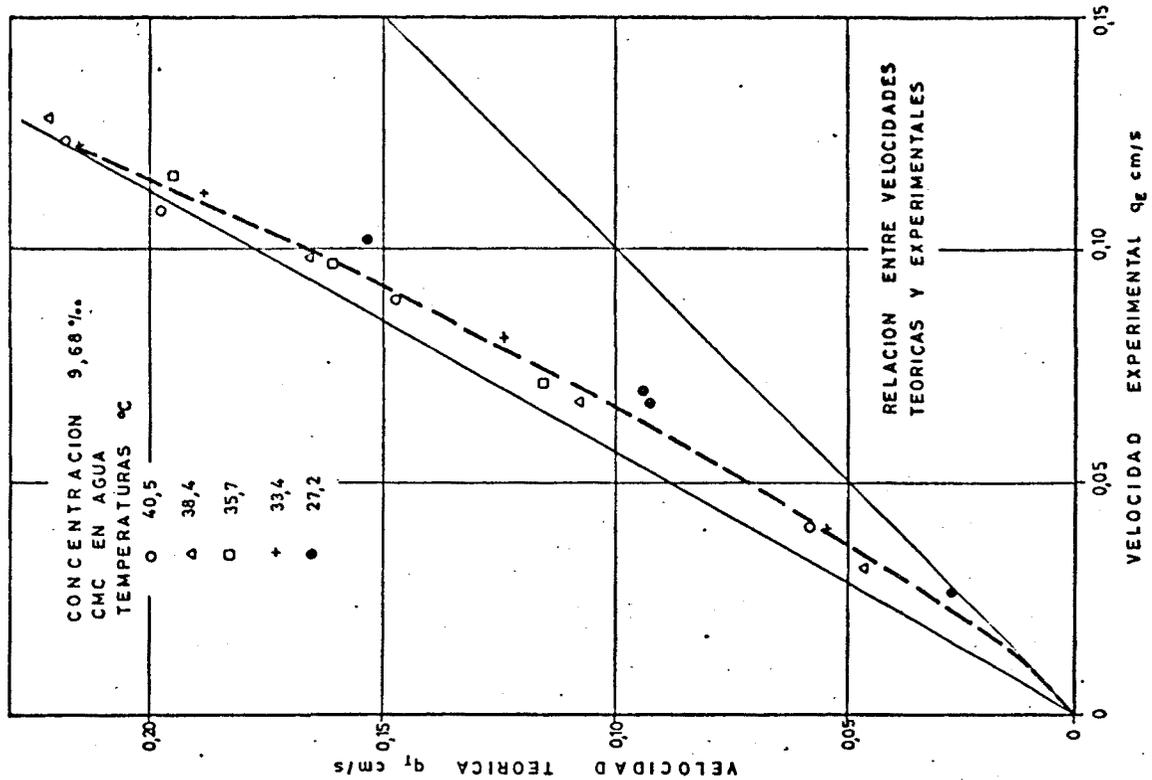
FLUJO DE FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

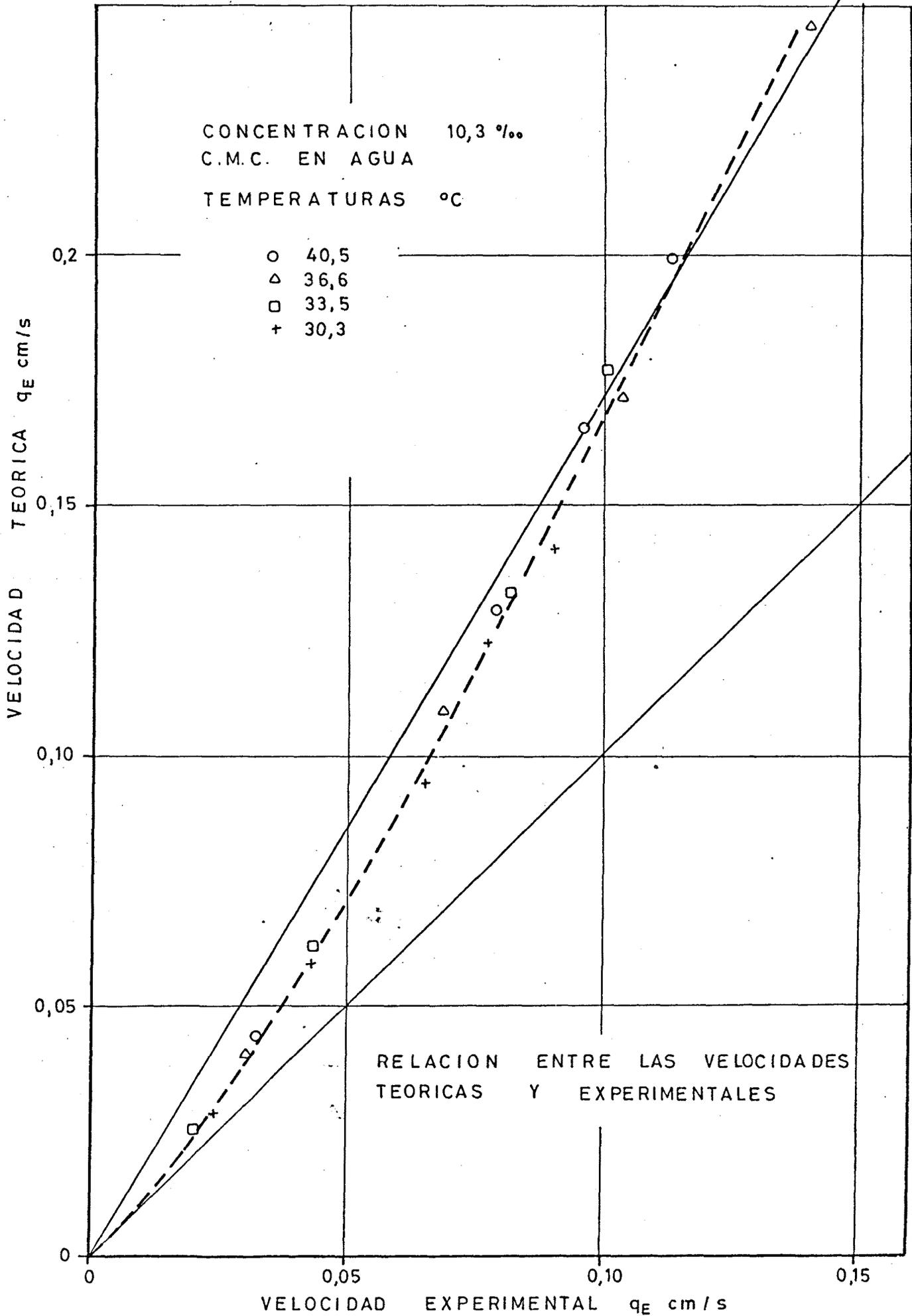
Fig. 4.54



FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.55





La importancia relativa de ambos fenómenos - no se puede establecer de una manera precisa, aunque observando las figuras 4.46 a 4.56, en las que se relaciona el gradiente de presiones y velocidades experimentales y teóricas, parece indicar que el incremento del número de REYNOLDS local tiene mayor importancia.

Nótese el incremento progresivo de la pendiente de la línea de correlación, a trozos, al crecer cualquier magnitud. Este prematuro régimen no laminar se observa en las soluciones diluidas o moderadamente concentradas en polímero (7,36).

Que la pendiente de la línea a trozos sea - distinta de la recta a 45°, significa que la viscosidad equivalente, que haría cumplir la ley de DARCY para el fluido no newtoniano, es distinta de la definida por consideraciones teóricas a partir de la ley de OSTWALD (ψ). El valor experimental obtenido, para una velocidad y constante, da que ψ teórico es menor que el ψ experimental - luego, la velocidad experimental menor que la teórica - Fig. 4.52 a 4.55, pero, además, se constata la desviación del fenómeno real de la supuesta linealidad respecto al modelo teórico, ya que no se sitúan sobre una recta las correlaciones resultados experimentales-teóricos. La línea a trozos da la correlación real y la recta la lineal, encontrándonos frente a una relación :

$$\frac{\psi_T}{\psi_E} = \left(\frac{\Delta P_T}{\Delta P_E} \right)^\alpha$$

En el estudio realizado, se han obtenido los resultados del ajuste de los datos experimentales, velocidades de filtración-gradientes de presiones, según una ley idéntica a la de DARCY generalizada. De esto se ha obtenido el coeficiente e índice de pseudoplasticidad para cada temperatura.

En las figuras 4.58 y 4.59, se representan los resultados del citado ajuste junto con los obtenidos a partir de los datos reométricos del cono-plato.

En la figura 4.58 se han eliminado los puntos aquellos para los cuales la distancia cuadrática media supera o iguala el valor de 6 (calculado sobre el gradiente de presiones, orden de magnitud 100 a 600 dinas/cm³). Con los puntos restantes, parece ser que existe una cierta correlación, quedando acotada la relación n experimental respecto de n reométrica cono-plato entre 1,2 y 1,1, lo que supone una cierta newtonización del comportamiento o menor interacción molecular (la formación de ovillos moleculares supone una interacción molecular menor). Esta cierta disminución del carácter pseudoplástico, al comparar los resultados del derrame con los de la reometría cono-plato, se aprecia también en las gráficas de las figuras 4.28 a 4.33 (nótese la forma rectilínea de la representación experimental, frente a la teórica; se cita frecuentemente en la literatura como comportamiento dilatante de un fluido pseudoplástico).

La figura 4.59 representa la evolución pareja de los coeficientes experimentales y teóricos en función del índice de pseudoplasticidad, deducido de la ca-

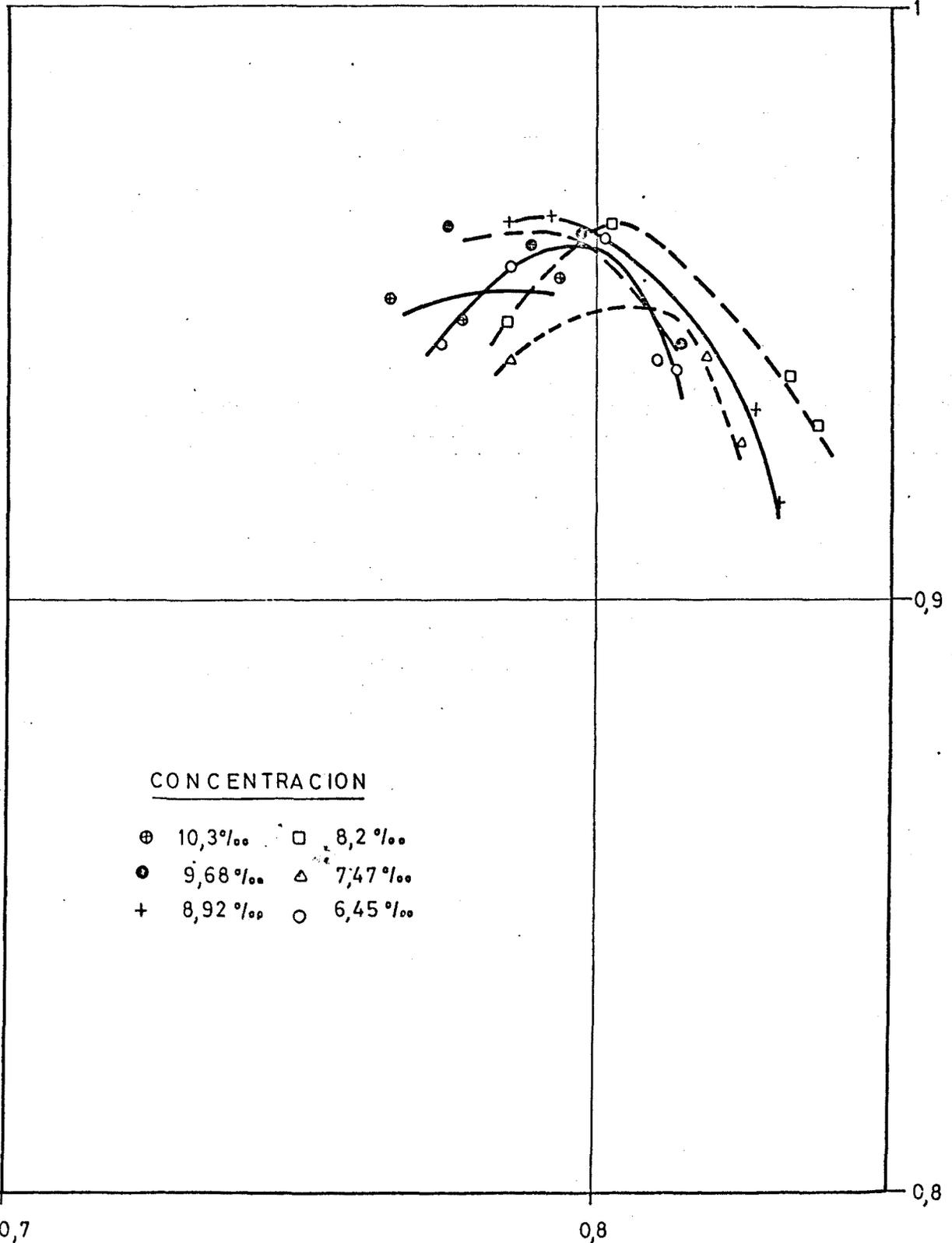
FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO

A TRAVES DEL MEDIO POROSO

327.-
Fig. 4.58

CORRELACION ENTRE LOS INDICES DE SEUDOPLASTICIDAD
OBTENIDOS POR AJUSTE DE LA LEY DE Darcy GENERALIZADA
Y POR DETERMINACION EN EL REOMETRO CONO-PLATO

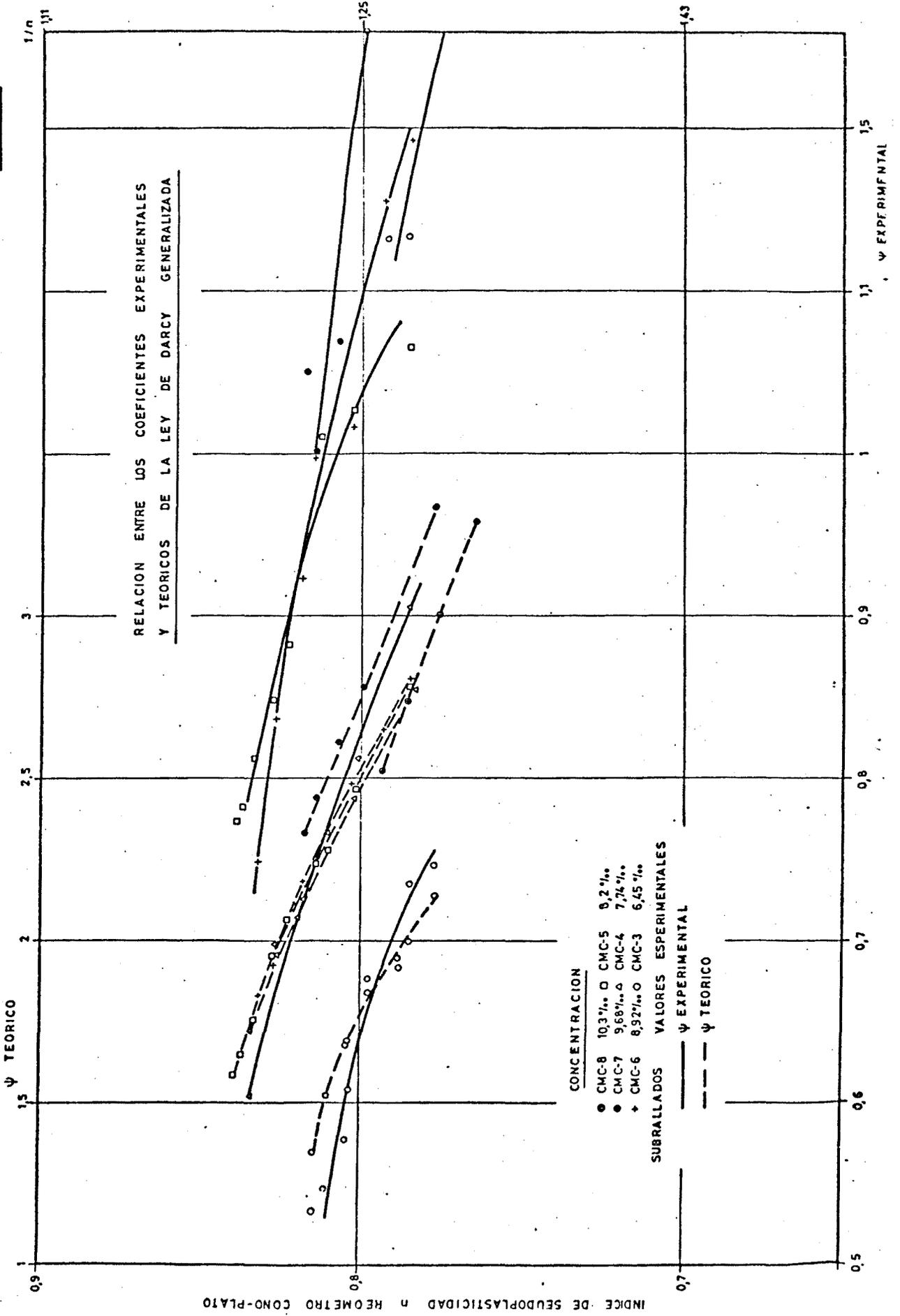
INDICE DE
SEUDOPLASTICIDAD
LEY DE DARC



INDICE DE SEUDOPLASTICIDAD n
REOMETRO CONO - PLATO

FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.59



racterización en el cono-plato. Las diferencias mas acusadas se traducen por un efecto de escala y no en cuanto a la naturaleza de la relación funcional que pueda existir entre n y ψ .

Al respecto, podemos citar los resultados obtenidos por CHRISTOPHER y SADONSKI (8,30), utilizando la expresión generalizada :

$$q^n = (\bar{\phi})^n \frac{d^{n+1}}{K'} \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

con :

$$\bar{\phi} = \left(\frac{1}{2t'}\right)^{1/n} \left(\frac{m}{3(1-m)}\right)^{1+1/n} \frac{m}{n}$$

empleando el primero, $m = 0,37$ y $t' = 25/12$, y el segundo, $0,3653 \leq m \leq 0,3883$ y $t' = 2,5$, y partiendo de reometría capilar. En ambos existe una marcada dispersión de los resultados teóricos respecto de los experimentales, observándose que los resultados teóricos varían desde el 100 al 200 e incluso al 300% del valor experimental.

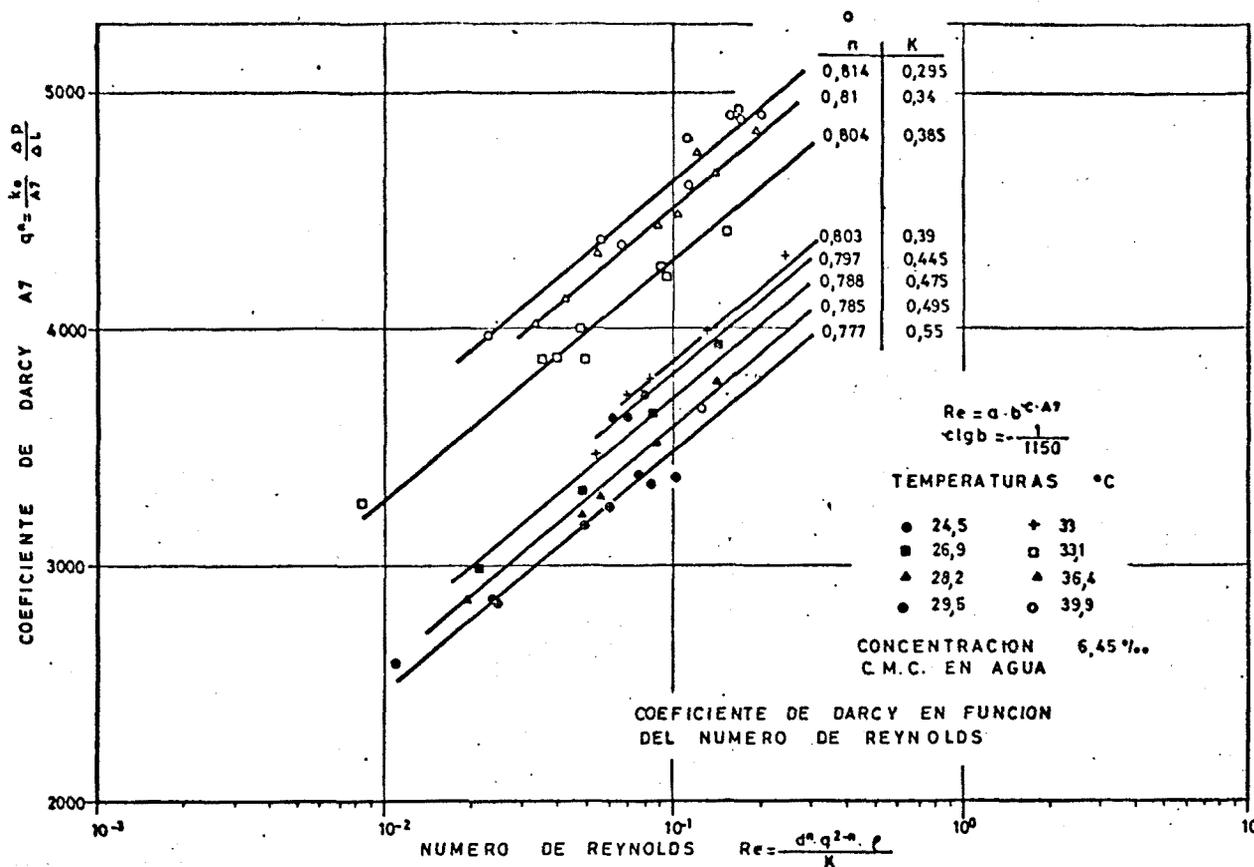
Si la ley de DARCY generalizada se aplica a cada resultado experimental, imponiendo el índice de seudoplasticidad deducido de los ensayos de reometría, se encuentra el valor que debería adoptar el coeficiente de la ley ψ , que en este caso se expresa A7, para cumplir la citada ley.

Los resultados se muestran, en función del número de REYNOLDS, en las figuras 4.60 a 4.65. La correlación existente posiblemente sea la de la forma :

$$Re = a \cdot b^{c \cdot A7}$$

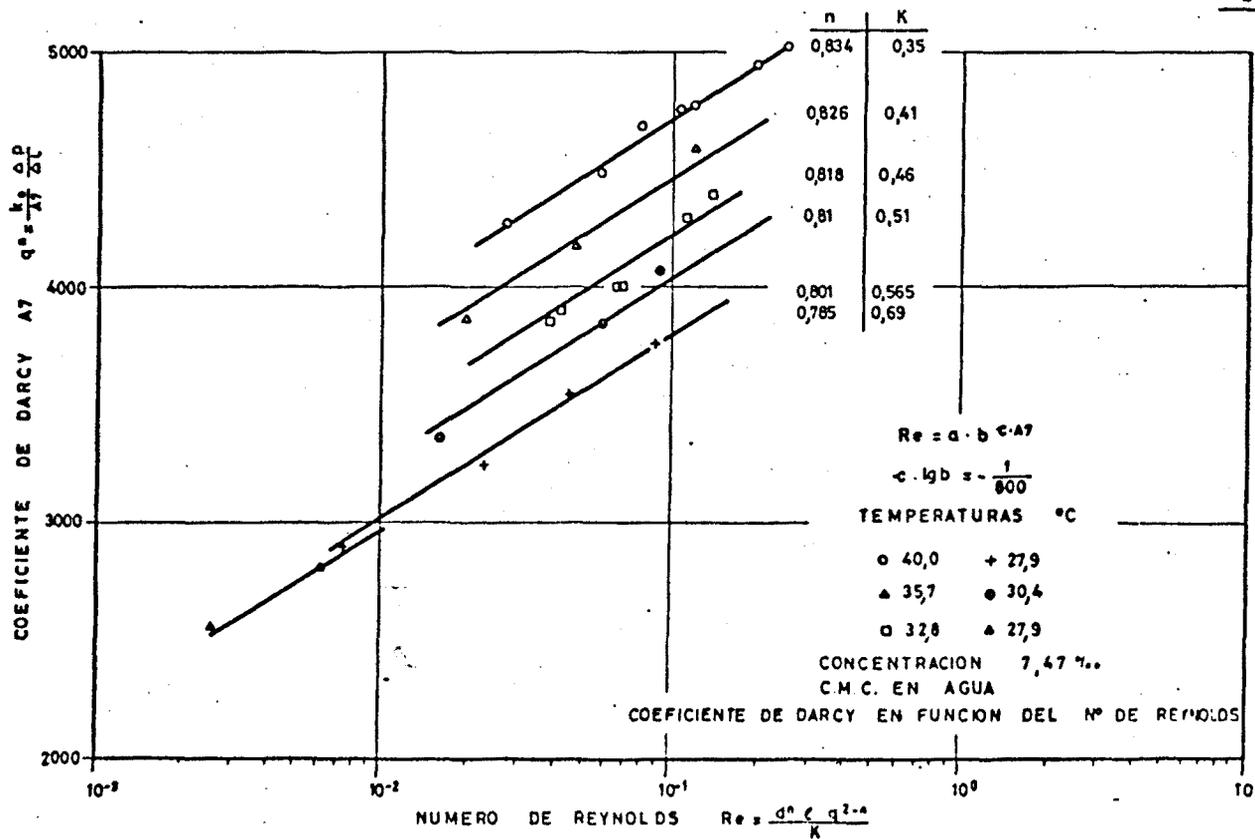
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.50



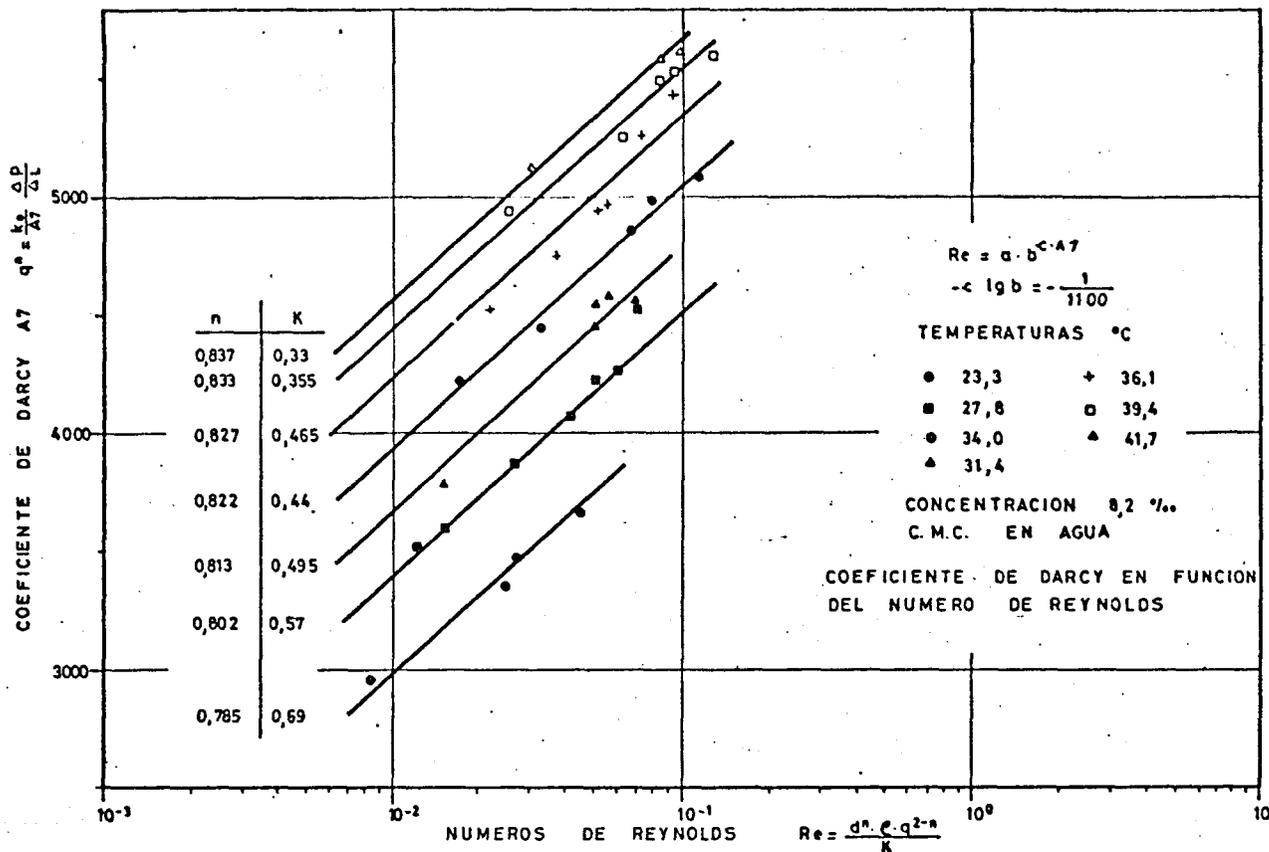
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.61



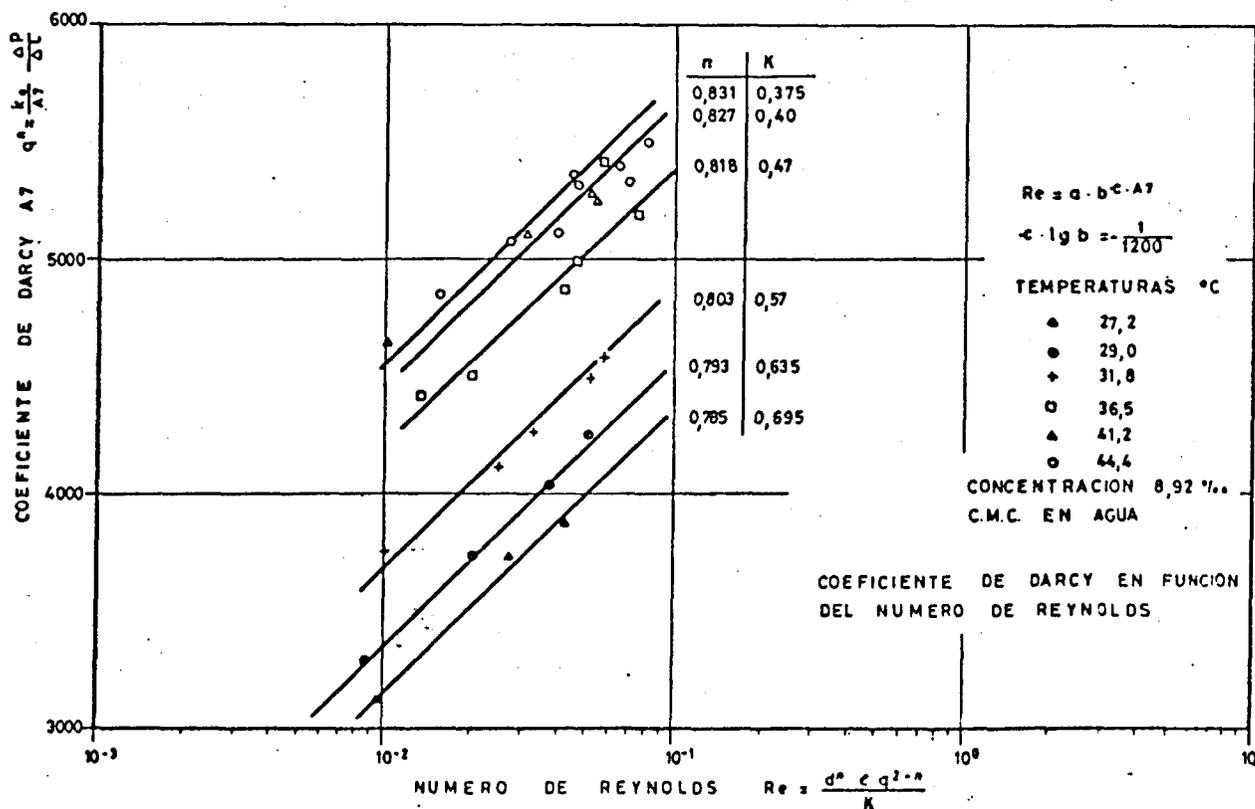
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig 4.62



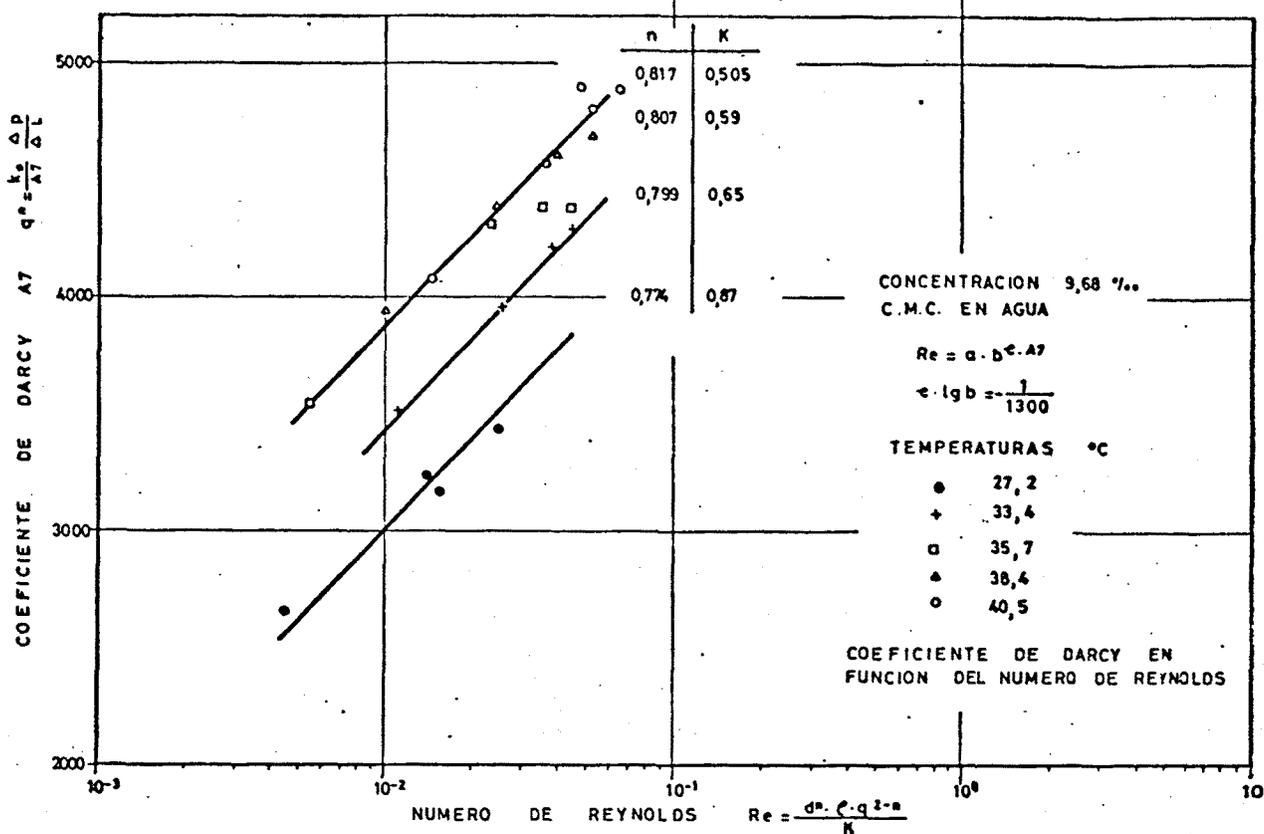
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.63



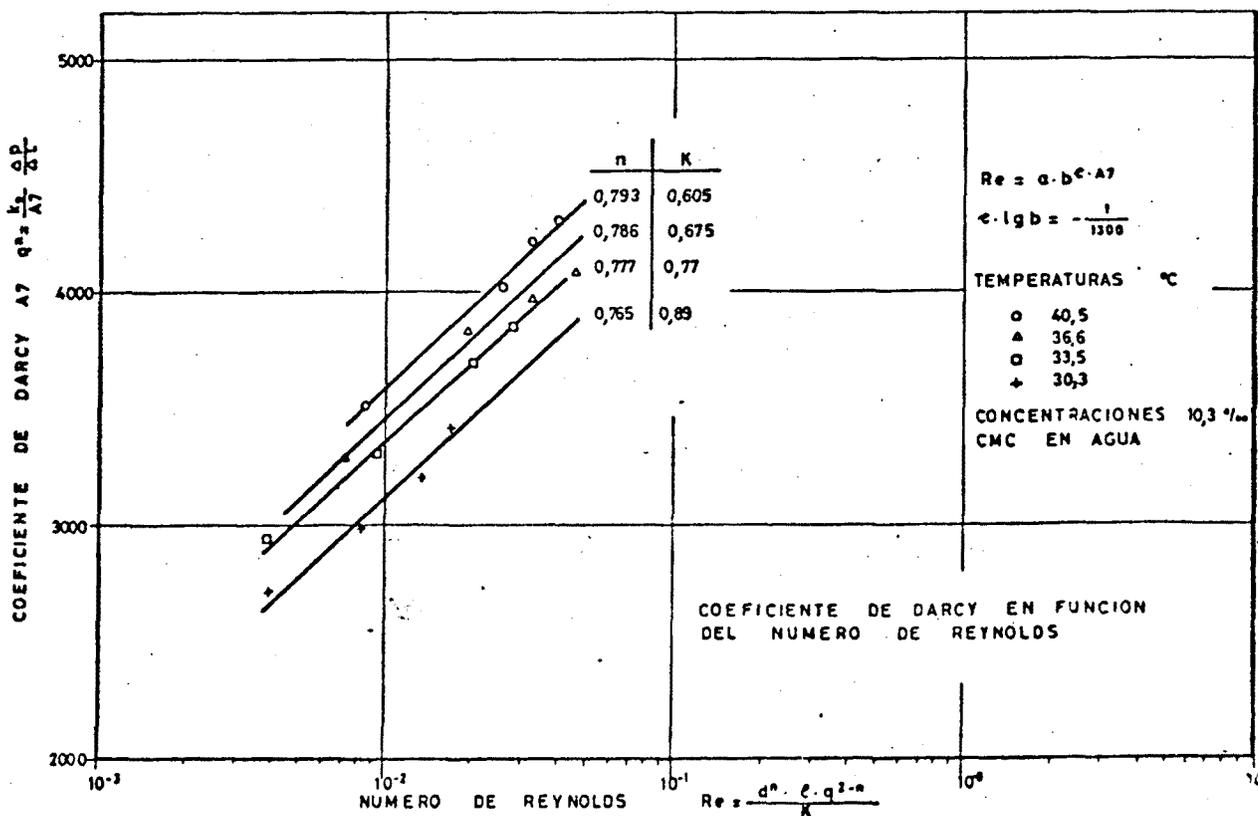
— FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO A TRAVES DEL MEDIO POROSO —

Fig.4.54



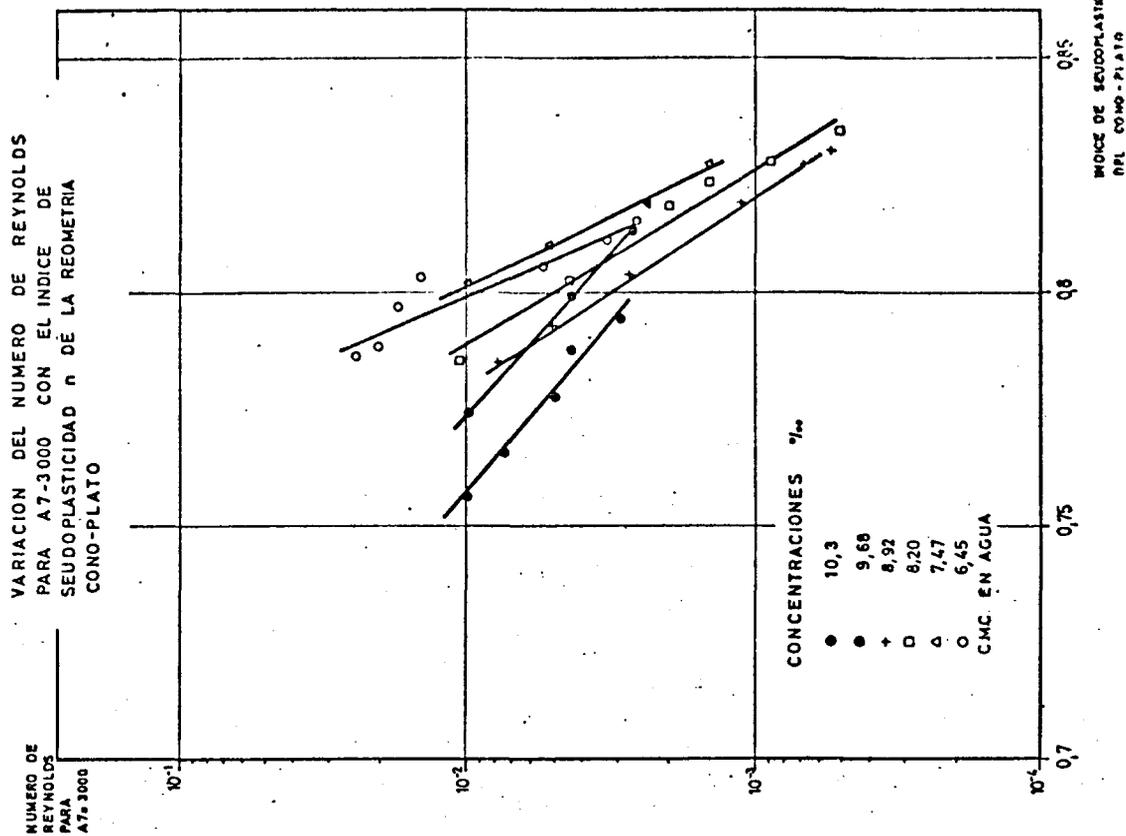
— FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO A TRAVES DEL MEDIO POROSO —

Fig.4.65



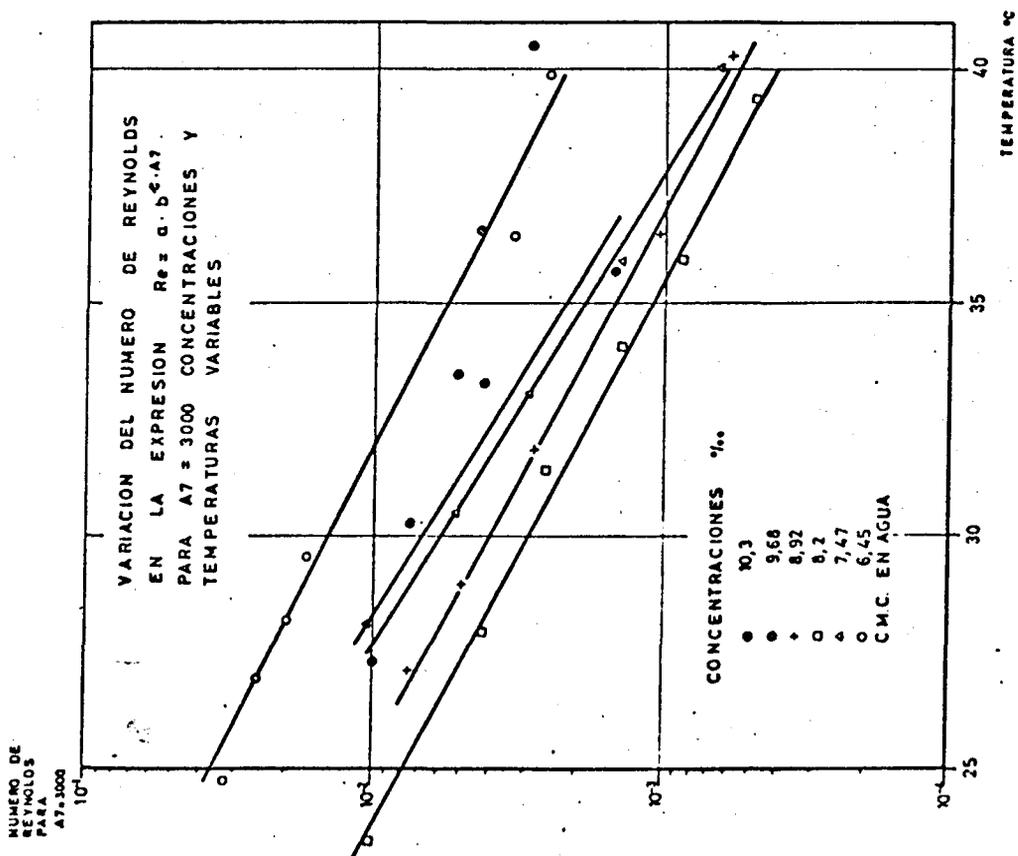
FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.67



FLUJO DE UN FLUIDO SEUDOPLASTICO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.66



siendo c y b valores constantes para cierta concentración. Existe un manifiesto paralelismo en cada concentración - para las diversas temperaturas y el valor que toma para cada concentración.

La coordenada, valor del número de REYNOLDS, para un A7 dado, en este caso 3000, análoga al valor de "a" varía con la temperatura, con la concentración y con el índice de pseudoplasticidad, de lo que se desprende de las figuras 4.66. y 4.67.

Con los datos existentes no se pueden sacar unas conclusiones respecto a la aplicabilidad y establecimiento de coeficientes de la ley de DARCY generalizada, por lo que nuevos estudios deberían emprenderse considerando otros factores, tales como geometrías diferentes, cadenas poliméricas diversas y con distintos pesos moleculares, variabilidad de n y K más amplia.

4.3.2.3. - ANALISIS DE LA LEY DE DARCY SIMPLE. VISCOSIDAD DE DARCY

Es frecuente la generalización de las ecuaciones de la mecánica de los Fluidos newtonianos a los no newtonianos, introduciendo conceptos de viscosidades aparente, diferencial, equivalente, etc. de definición - y medida arbitraria.

Partiendo de esta idea se puede aplicar la - ley de DARCY simple o newtoniana :

$$V = \frac{k_o}{\mu D} \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

y la de derrame laminar en una tubería :

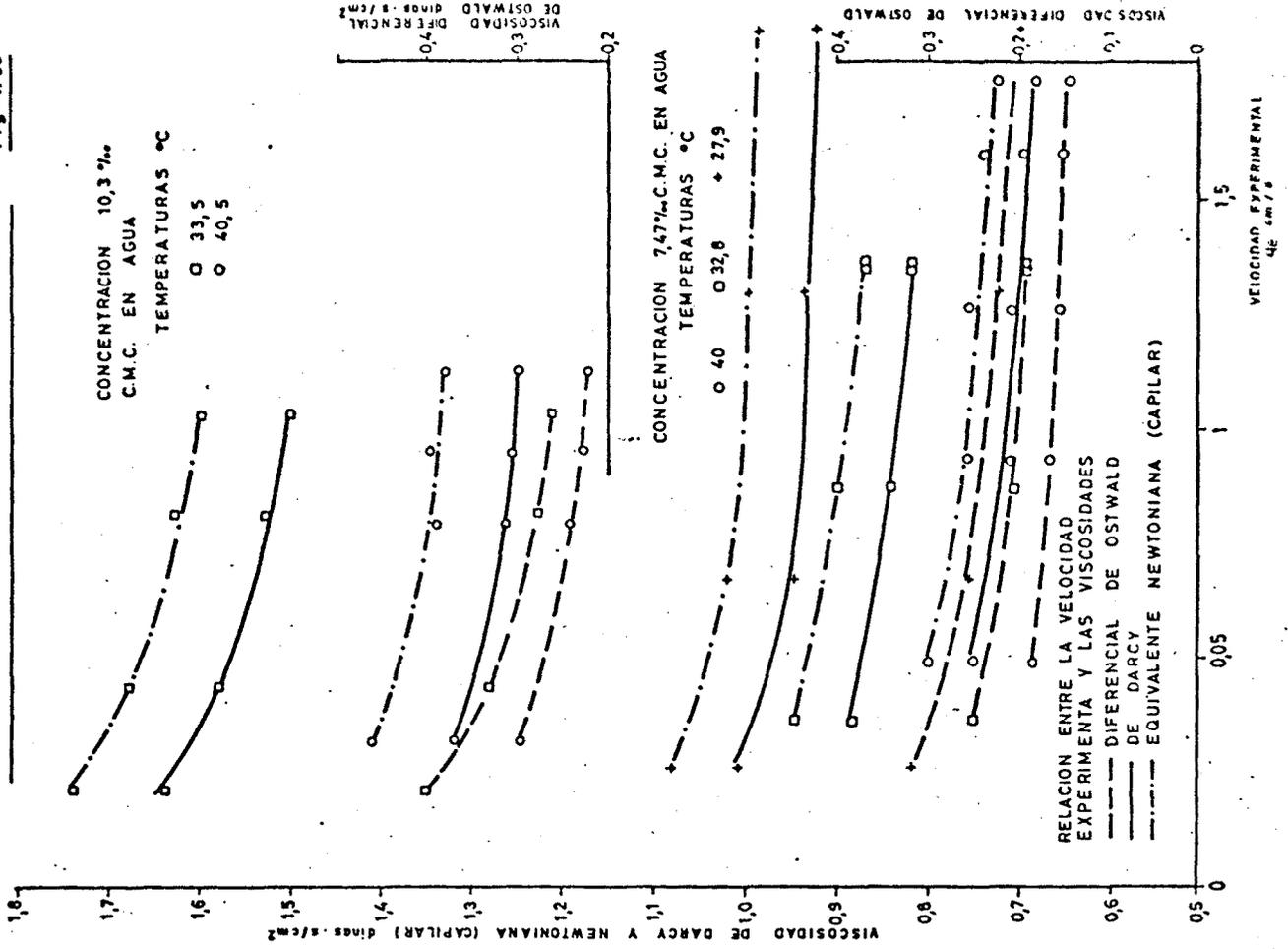
$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \text{ con } Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu_N}$$

al derrame de un fluido pseudoplástico en un medio poroso. Esto supone establecer la analogía capilar en un caso y definir las viscosidades equivalentes en ambas. ($\mu_D =$ = viscosidad de DARCY, $\mu_N =$ viscosidad newtoniana equivalente).

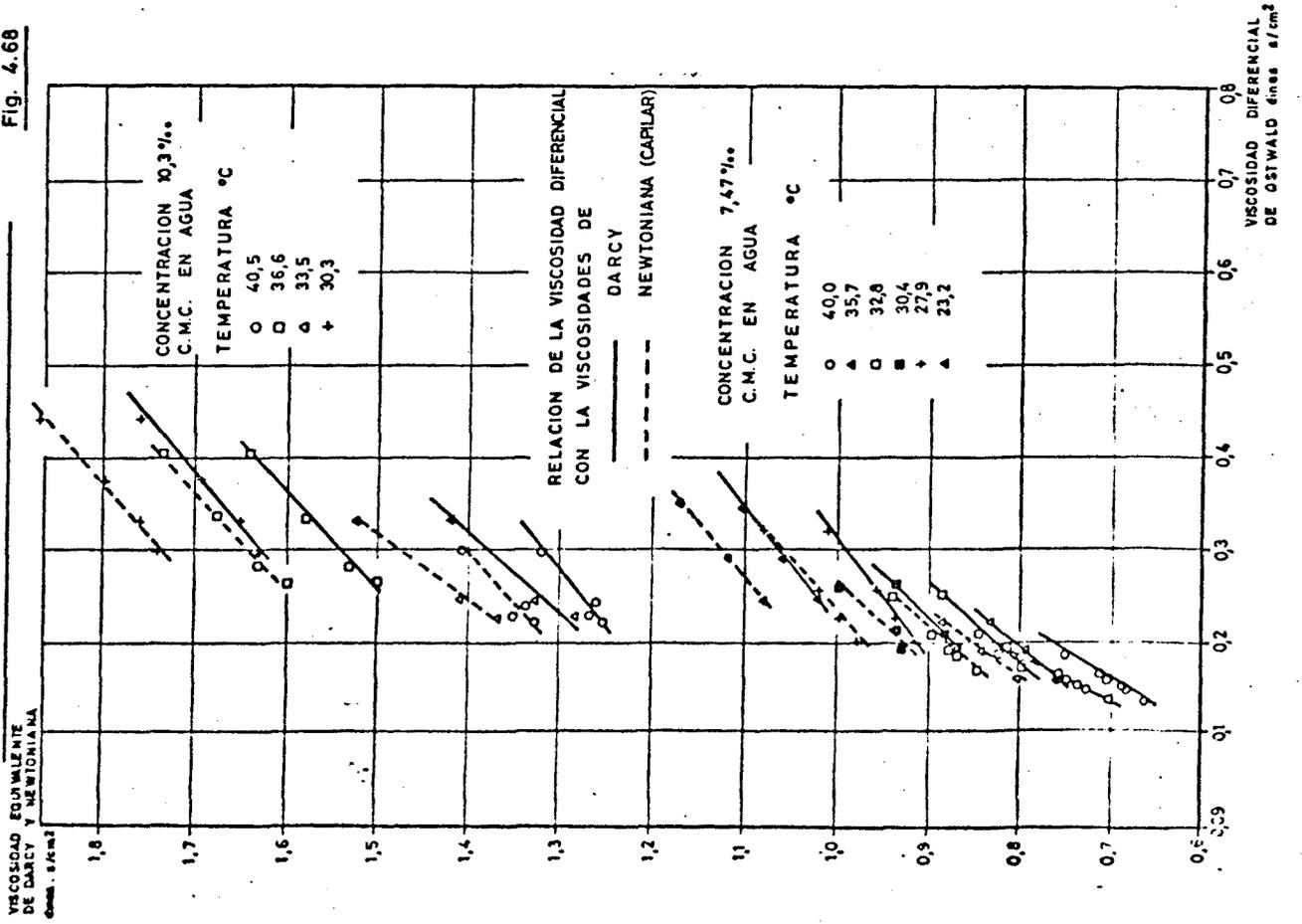
En este sentido, se han ajustado ambas expresiones de DARCY y derrame laminar a las observaciones experimentales, calculándose en cada caso las viscosidades de DARCY y newtoniana equivalente. Asimismo, se ha determinado la viscosidad diferencial del modelo de OSTWALD, empleándose para ello los datos de caracterización reométrica obtenidos con el reoviscosímetro cono-plato y el esfuerzo cortante aparente medio ya citado en 4.3.2.1.

Se ha de hacer notar que el concepto de viscosidad de DARCY y newtoniana equivalente son análogos - por el mismo origen y naturaleza de las dos expresiones y, por lo tanto, sólo se diferencian en una constante. - (Recuérdese la definición de k_o permeabilidad intrínseca a partir del modelo capilar). Por contra, la viscosidad diferencial de OSTWALD no presenta ninguna analogía de definición respecto a las anteriores, por haber sido deducido sobre el reograma. El único concepto en común es el del esfuerzo cortante definido por analogía capilar, pero se nos presenta elevado a un exponente función del

FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO — Fig. 4.69



FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO — Fig. 4.68



índice de pseudoplasticidad en la viscosidad de OSTWALD.

La figura 4.68 da la correlación entre las viscosidades de DARCY y newtoniana equivalente con la diferencial de OSTWALD. Se aprecia que entre ambas existe una correlación lineal variable con la temperatura y con la concentración.

En la figura 4.60 se presenta la variación de las tres viscosidades con la velocidad experimental (análoga al gradiente de velocidades). Para cada temperatura y concentración, la evolución, en función de la velocidad, de las tres viscosidades es idéntica, de donde se deduce la completa correlación existente entre la viscosidad de DARCY y newtonianas equivalente, deducidos y representativas del derrame, con la viscosidad diferencias de OSTWALD, representativa del carácter reológico pseudoplástico del fluido. En todas se considera un estado de velocidades o gradientes idéntico, dada la constancia de la forma geométrica.

Caracterizado reológicamente un fluido y conocido el gradiente de presiones disponible, es decir, el esfuerzo cortante medio, se puede definir la viscosidad diferencial de OSTWALD y, de ella, la permeabilidad aparente a aplicar a la ley de DARCY normal, en caso de haberse obtenido la expresión de esta permeabilidad para el fluido y la geometría dada.

Observando que el medio poroso en el que se realizó el derrame es un medio complejo, comparado con la geometría de un cono-plato o de un capilar, y que el

comportamiento al flujo de un fluido no newtoniano está relacionado con las dimensiones del canal, advertimos en nuestro caso, la coexistencia de toda una gama de gradientes de velocidades y toda una serie de fenomenologías al margen del propio carácter pseudoplástico y que afectan al derrame (analizadas en 4.3.2.2.) También el comportamiento de un no newtoniano y de un newtoniano no es el mismo para una misma geometría, no aún el newtoniano (recuérdese el concepto de porosidad eficaz variable según el fluido newtoniano en derrames lentos p.e. agua a través de arcilla (24)). Lo que se pone en cuestión es la validez de conceptos tales como porosidad, permeabilidad intrínseca, tortuosidad, radio hidráulico, que, deducidos de una analogía capilar por medio de un fluido newtoniano, se aplican a los no newtonianos (p.e. los fluidos pseudoplásticos producen bloqueo o disminución de flujo en las zonas de mayor permeabilidad, lo que, en el medio poroso homogéneo, heterogéneo a escala microscópica, produce una modificación de los parámetros clásicos, m , R_H , t' , k_o , - citados).

Esto nos lleva a poner siempre en cuestión la fórmula de DARCY generalizada, salvo en los casos en que la experiencia pone de manifiesto su bondad y aproximado comportamiento (también lo es la expresión universal de pérdidas de carga o de DARCY-WEISBACH) y a incidir en el posible interés de estudios basados en ellas magnitudes que intervienen en el fenómeno (análisis dimensional) : en reógramas, leyes reológicas, viscosidades diferenciales, números de REYNOLDS generalizados.

4.3.2.4. - ESTABLECIMIENTO DE LA ANALOGIA CAPILAR

A través de este capítulo IV se ha desarrollado el trabajo experimental paralelo al teórico basado en la analogía capilar de un medio poroso, de la que se obtiene la ley de DARCY.

Esta analogía implica la caracterización del medio poroso con un fluido newtoniano y, posteriormente, trabajar con los parámetros característicos obtenidos y el fluido no newtoniano.

Ahora se aborda la misma analogía, pero esquivando la caracterización del medio poroso por derrame y reteniendo sola la geometría. El medio poroso empleado es homogéneo, partículas esféricas, y homométrico, curva granulométrica poco dispersa; su diámetro al 50% puede ser representativo de la totalidad :

$$d_{50} = 2,475 \text{ m.m.}$$

y, de hecho, lo es, tal y como ha quedado patente en el apartado 4.2.3., al coincidir con gran aproximación los resultados de la caracterización por derrame con los establecidos por razonamiento puramente geométrico.

La analogía nos queda planteada a través de la expresión :

$$f = \frac{\Delta P}{\Delta L} \frac{d_{50} \cdot 2}{v \cdot \rho}$$

siendo f el coeficiente de fricción, a determinar partiendo de las experiencias.

También se ha calculado el número de REYNOLDS deducido del análisis dimensional para un fluido pseudo-plástico que sigue la ley de OSTWALD :

$$\text{Re } 1 = \frac{d^n \cdot \rho \cdot v^{2-n}}{K}$$

y el número de REYNOLDS modificado, que proviene del derrame en tuberías de fluidos no newtonianos :

$$\text{Re } 2 = \frac{d^n \cdot \rho \cdot v^{2-n}}{\frac{K}{8} \left(\frac{6n-2}{n} \right)^n}$$

(7,36,40,46) ambos pueden ser modificados a su vez si se tiene en cuenta la velocidad media en el poro, en lugar de la de DARCY, dividiendo, entonces, por el valor :

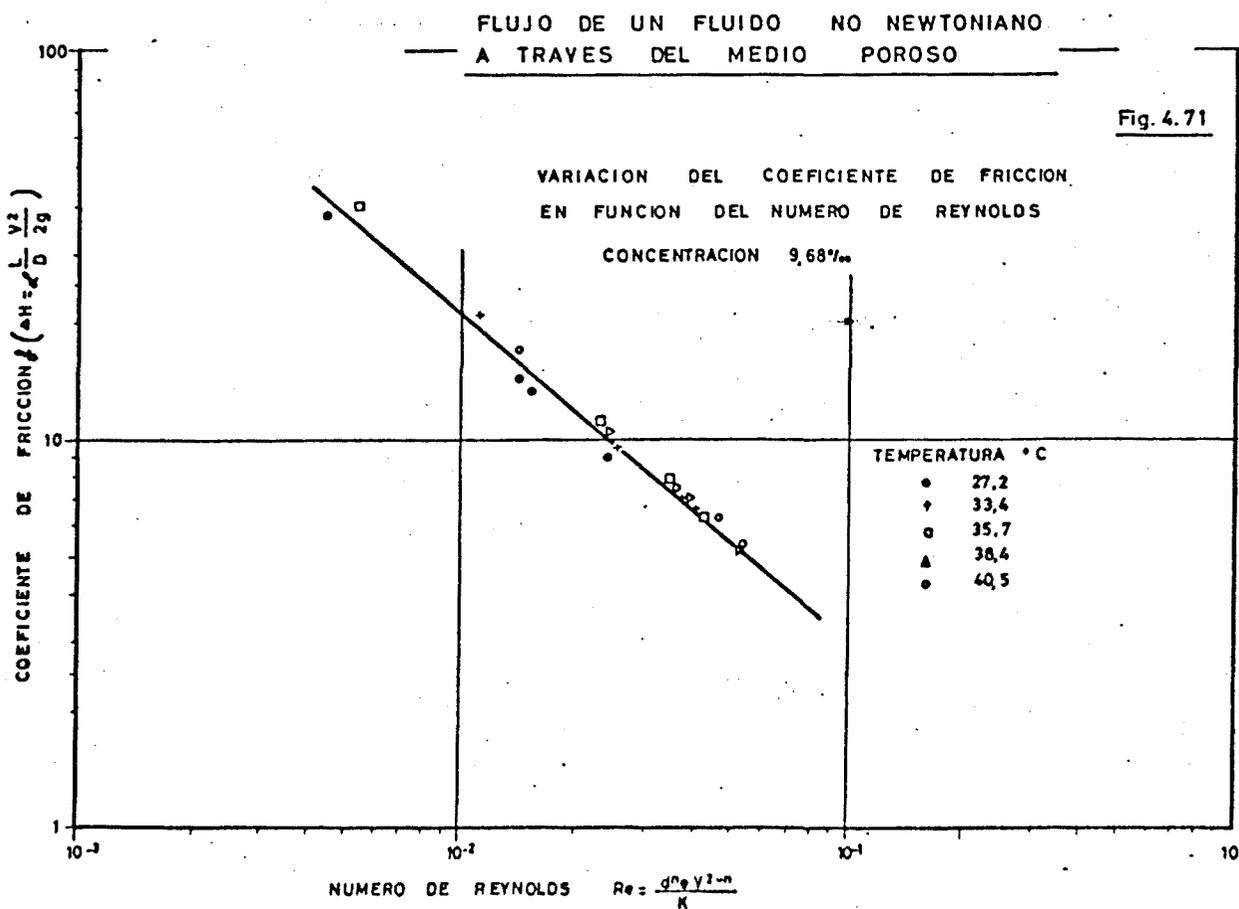
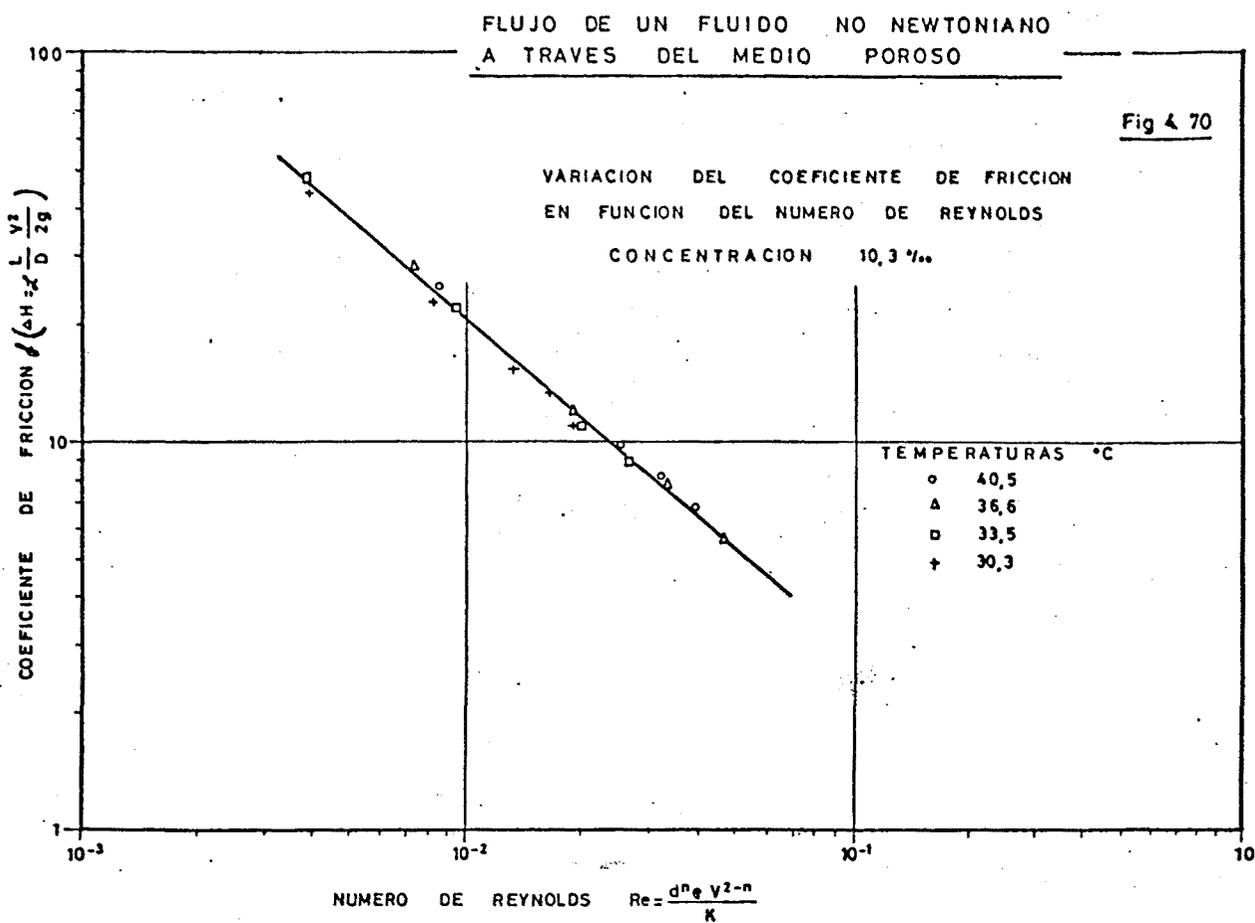
$$m^{(2-n)}$$

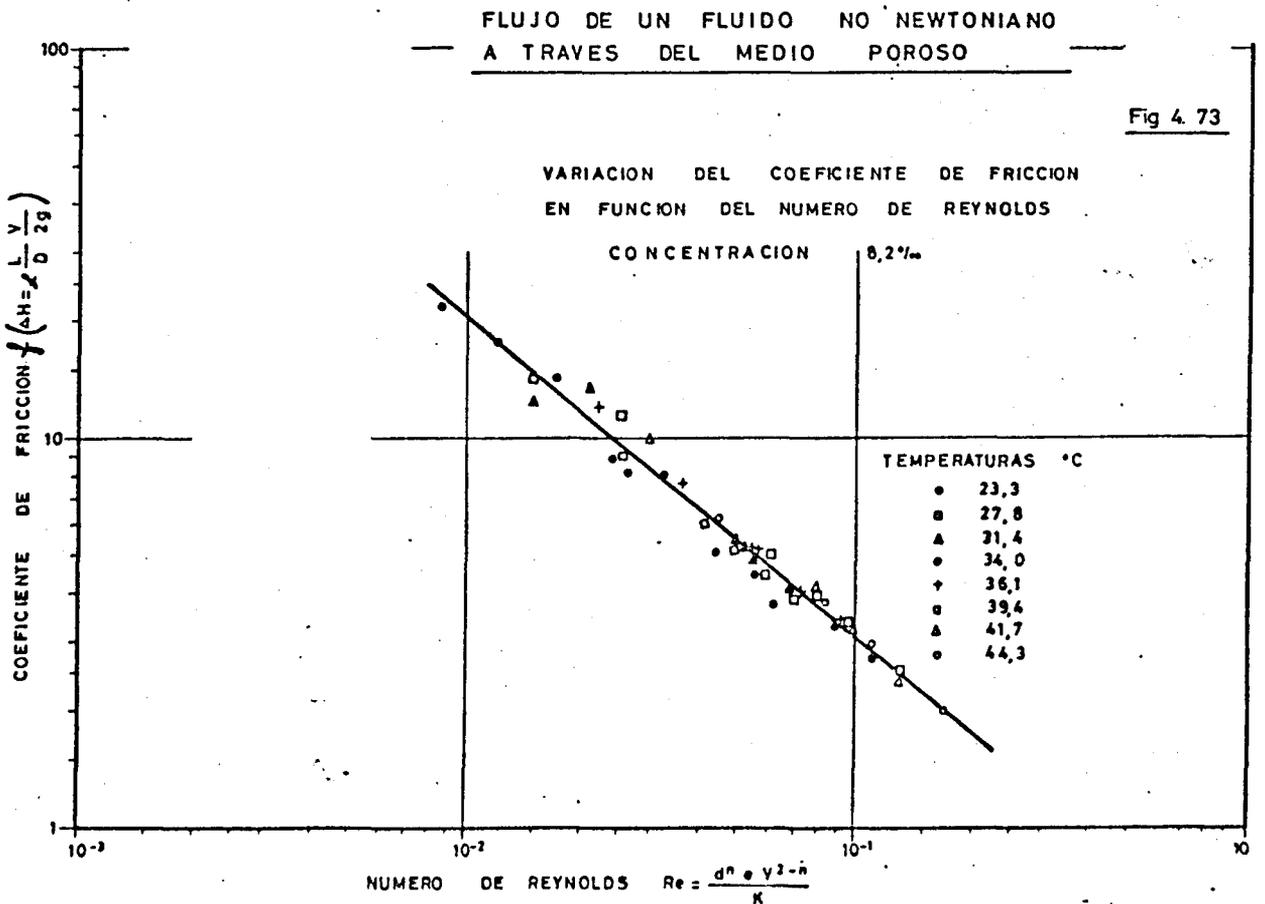
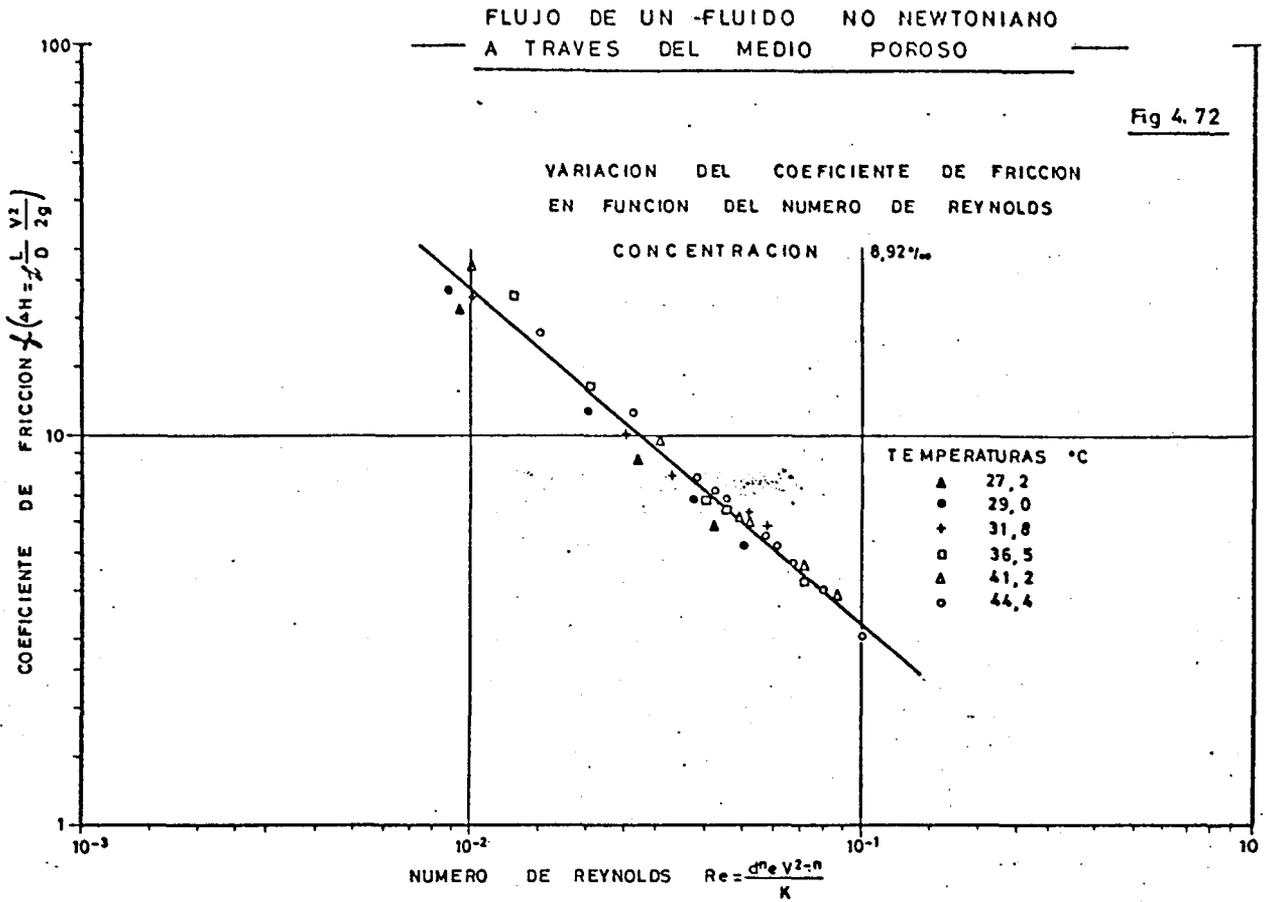
Las figuras 4.70 a 4.75 representan, para cada concentración y todos los caudales y temperaturas, la variación del coeficiente de fricción experimental con el número de REYNOLDS generalizado.

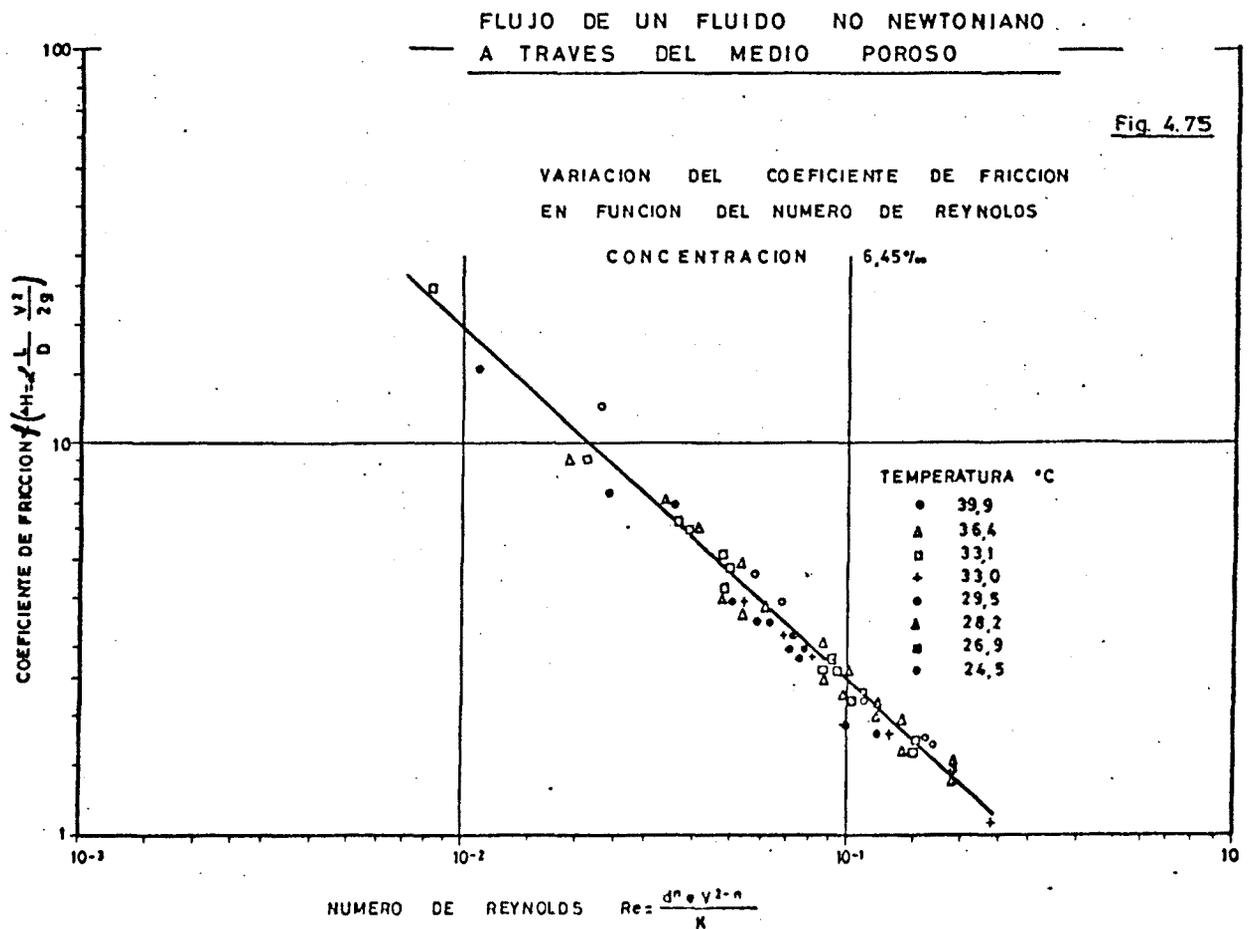
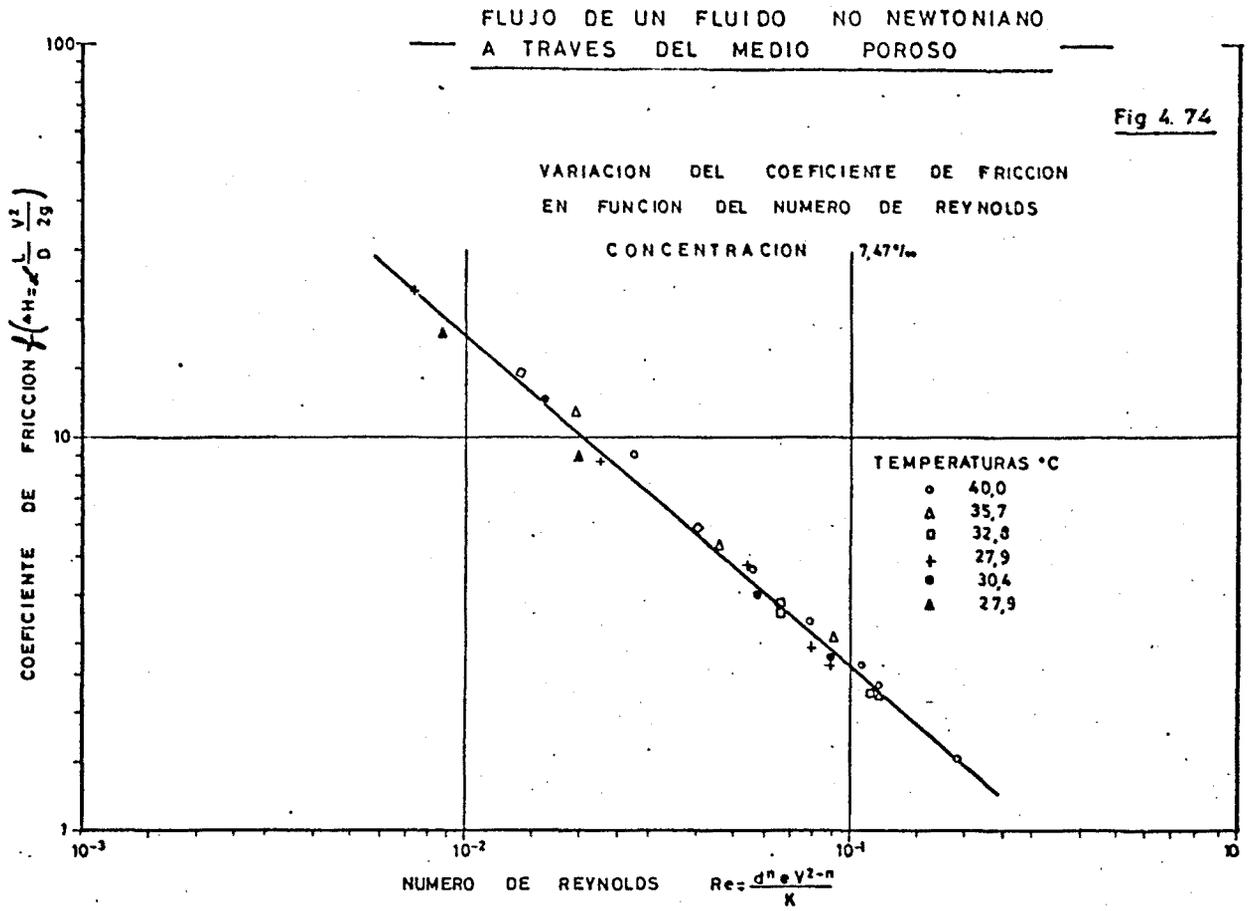
La correlación, en escalas logarítmicas, es perfecta, obteniéndose la recta típica del derrame laminar o de PIOSEUILLE en una tubería.

Las tendencias que pueden aparecer debidas a la diferencia de temperaturas son levemente apreciables y no cuantificables en este estudio.

En la figura 4.76 se representan buena parte de los puntos experimentales obtenidos para todas las -



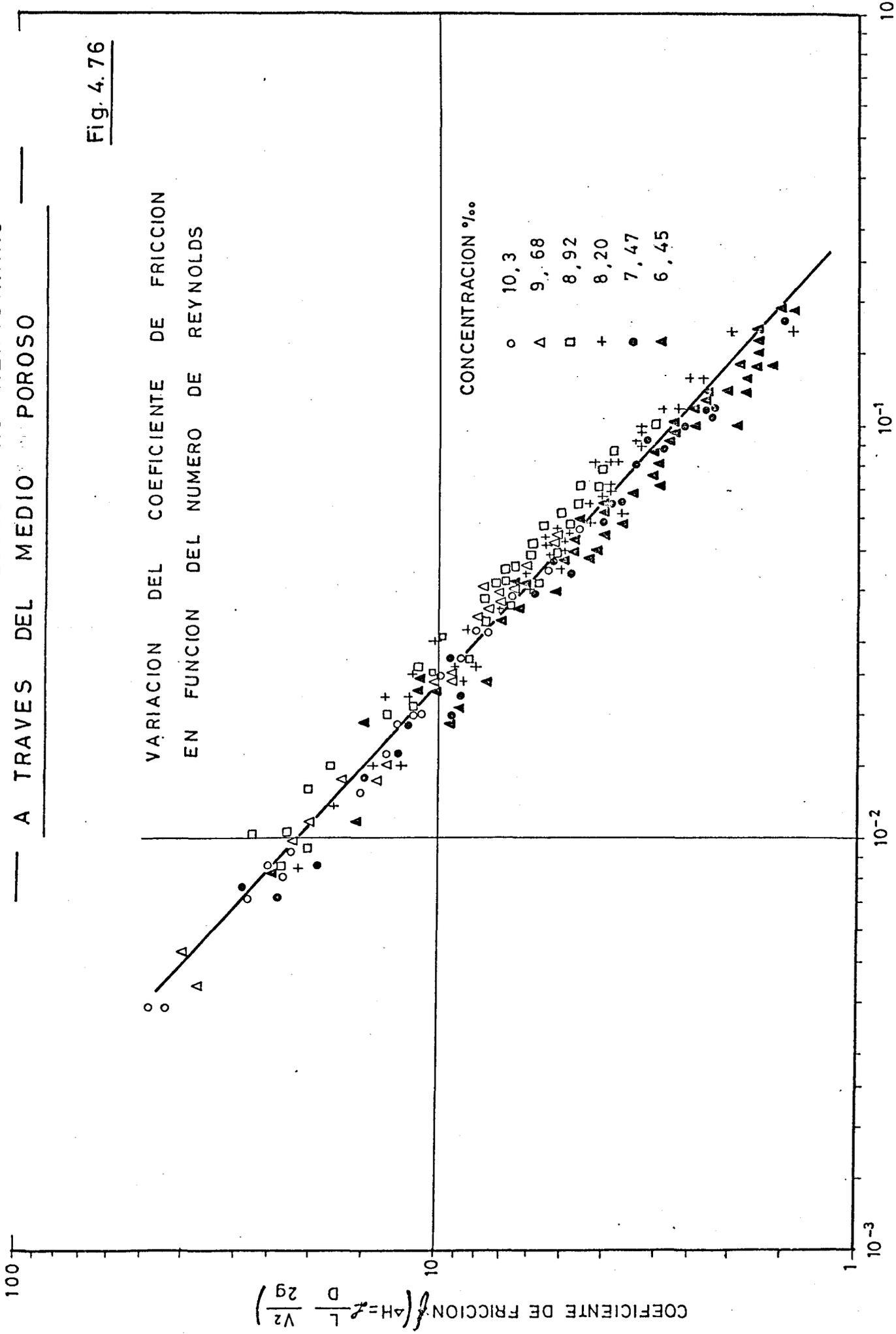




FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.76

VARIACION DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN
EN FUNCION DEL NUMERO DE REYNOLDS



concentraciones y sin distinguir temperaturas. No se aprecia, en este gráfico, ninguna tendencia, salvo la trivial de encontrar las menores concentraciones de CMC, desplazadas hacia los números de REYNOLDS mayores, dada su menor "viscosidad" aparente.

Como se puede advertir, el campo de variación de los números de REYNOLDS es amplio (de $3,4 \cdot 10^{-3}$ a $2 \cdot 10^{-1}$), y situado por debajo del crítico del régimen laminar citado por varios autores y salvando las diferencias entre las expresiones empleadas de este parámetro adimensional, aunque siempre análogas a las expuestas $(7,8) \cdot 10^{-4} < Re < 10^{-2}$, (si :

$$Re = \frac{d \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{72 \cdot t' (1-m) \mu} \quad \text{paramétrica} \quad (46) \quad Re < 2000, \text{ si}$$

$$Re = \frac{(4 \cdot R_H)^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{\frac{K'}{8} \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n} \quad (36) \quad \text{Idem (46) .}$$

En la figura 4.72, se deduce que, aproximadamente :

$$f = \frac{\text{cte 1}}{Re^1} \quad ; \quad \text{cte 1} = 0,275$$

y

$$f = \frac{\text{cte 2}}{Re^2} \quad ; \quad \text{cte 2} = 0,765$$

empleando la corrección de la porosidad, tendremos :

$$\text{Cte 1} = 1 \quad ; \quad \text{cte 2} = 2,8$$

Consideraciones del mismo tipo, tortuosidad, radio hidráulico, permeabilidad, etc, nos llevarían a formas análogas, estableciendo :

$$f = 16/Re \quad \text{ó} \quad f = 32/Re$$

formas clásicas de la literatura y en las que no se incide, pues consisten en justificar la modificación del valor de una constante experimental para reducirlas a valores más conocidos y frecuentes. A este nivel, la utilización del número de REYNOLDS, deducido del análisis dimensional, es correcta, no siendo necesario introducir modificaciones en él.

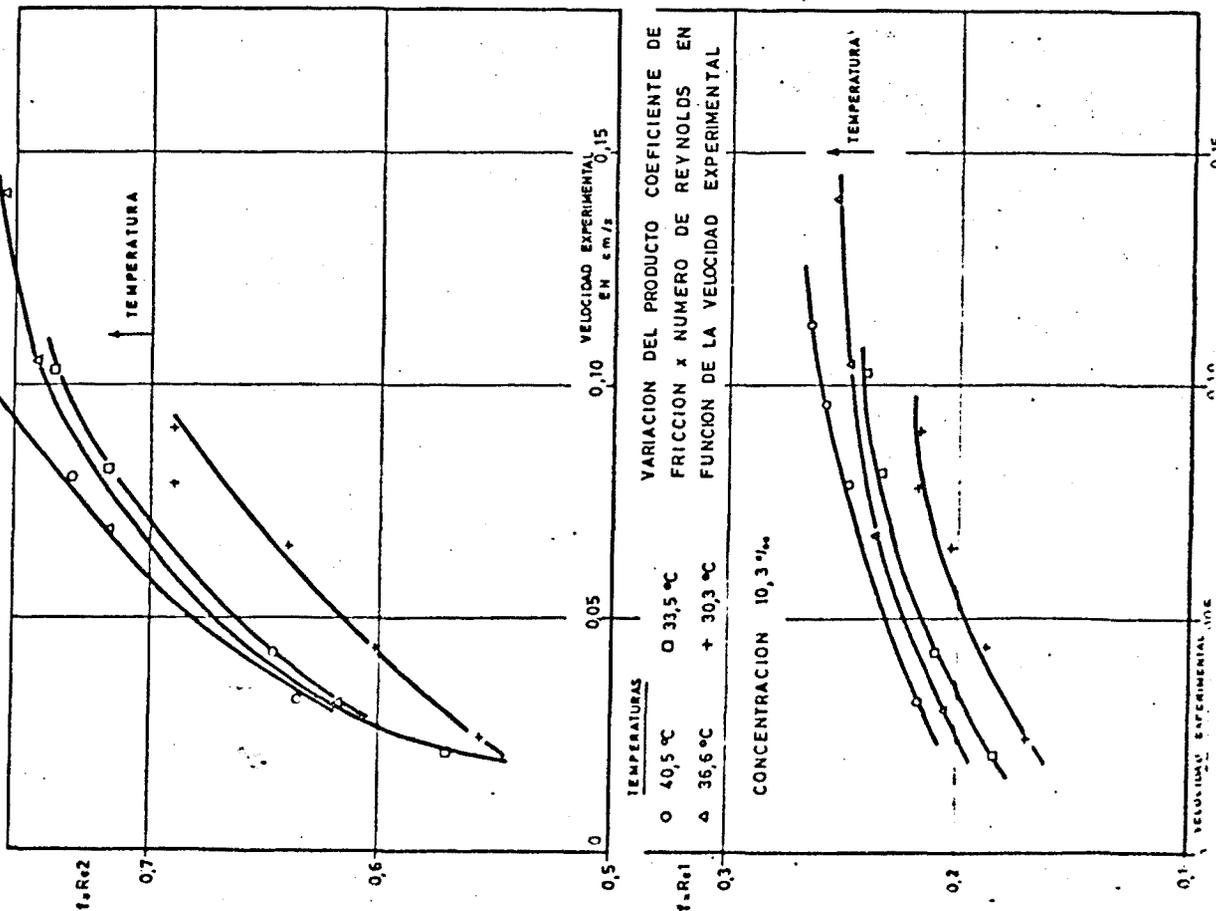
Para poner en evidencia las posibles evoluciones del coeficiente de fricción dentro de este comportamiento general, en las figuras 4.77 a 4.82 se representan los productos ($f \times Re$ 1) y ($f \times Re$ 2), es decir, las antes supuestas constantes de cte.1 y cte.2 para cada concentración y temperatura, en función de la velocidad experimental.

De las citadas figuras, se deduce que el coeficiente de fricción, a temperatura y velocidad dada, crece con la disminución de la concentración y que, a concentración y velocidad dada, crece al aumentar la temperatura.

Los incrementos del valor de la constante, es decir, los decrementos de concentración y/o aumentos de temperatura, dan una disminución de la pendiente de la línea recta que relaciona $\lg Re$ con $\lg f$.

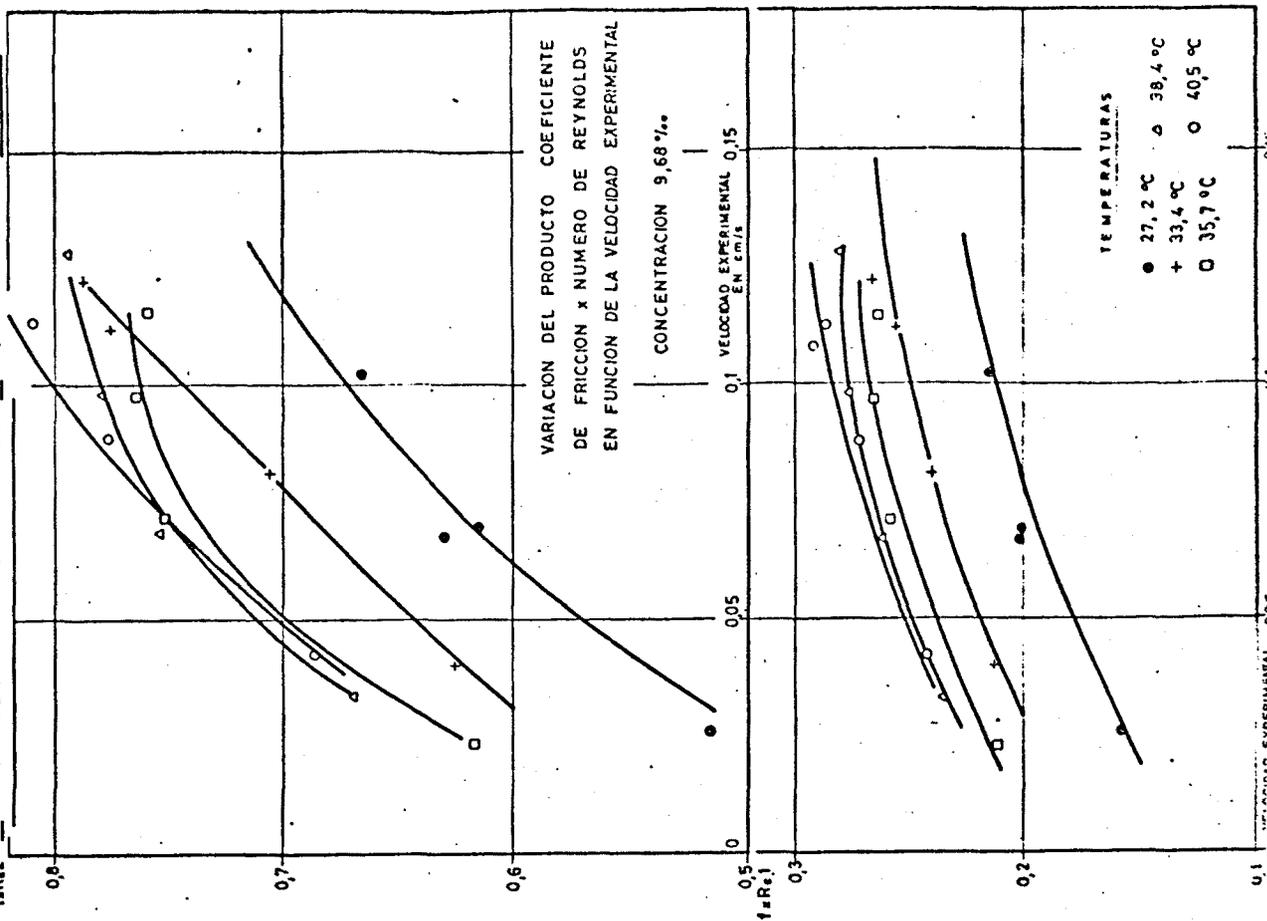
FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

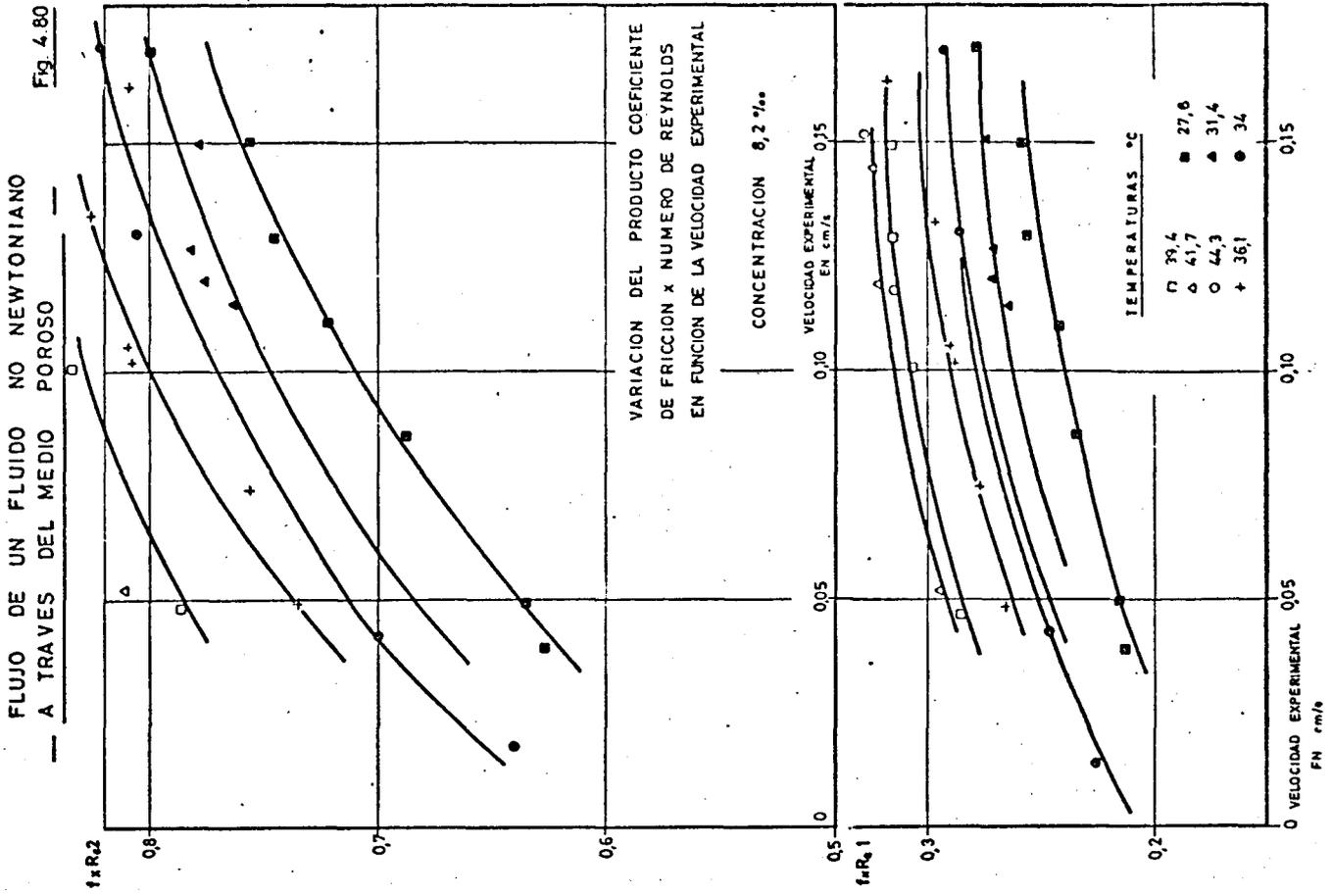
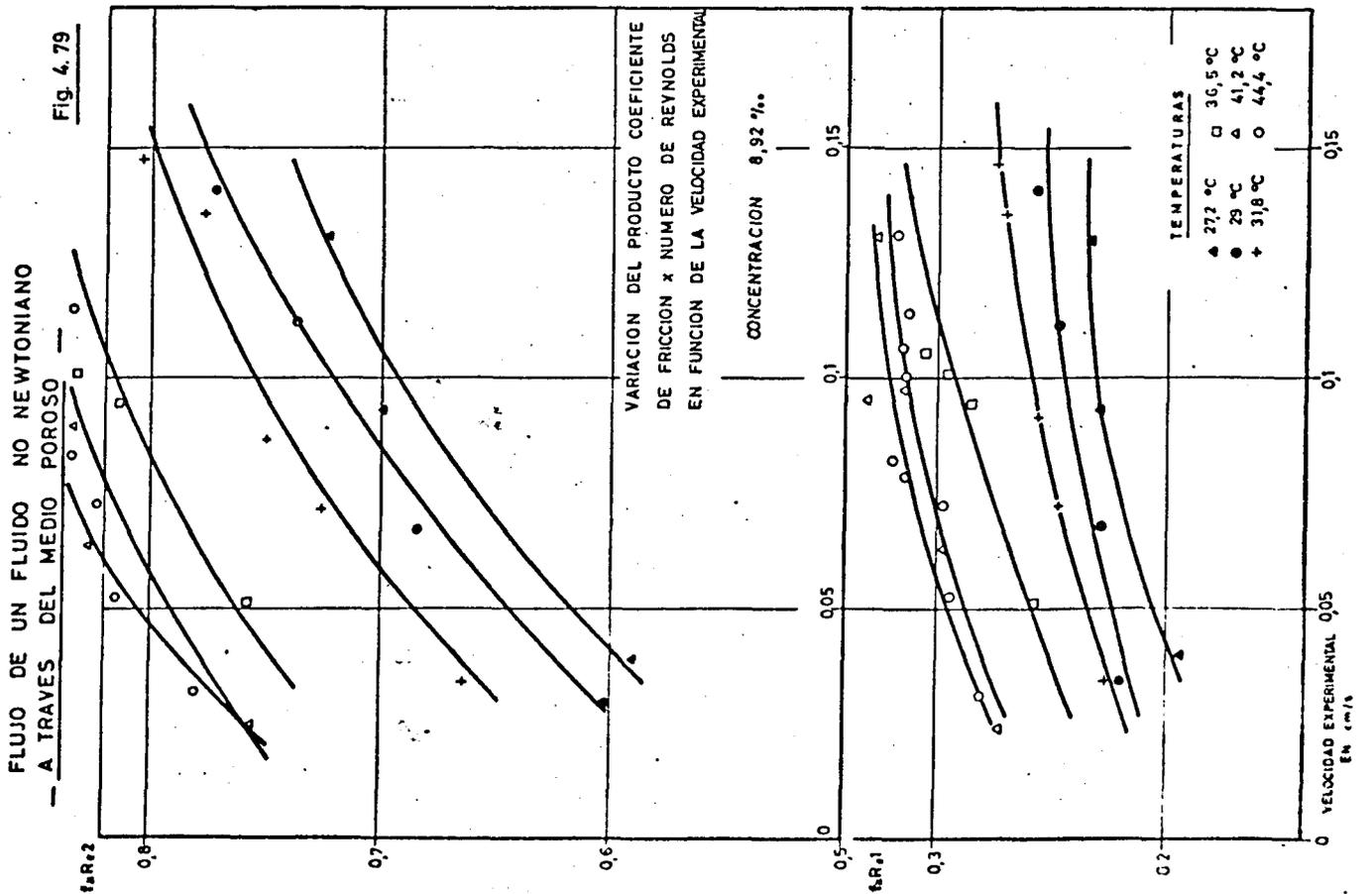
Fig. 4.77

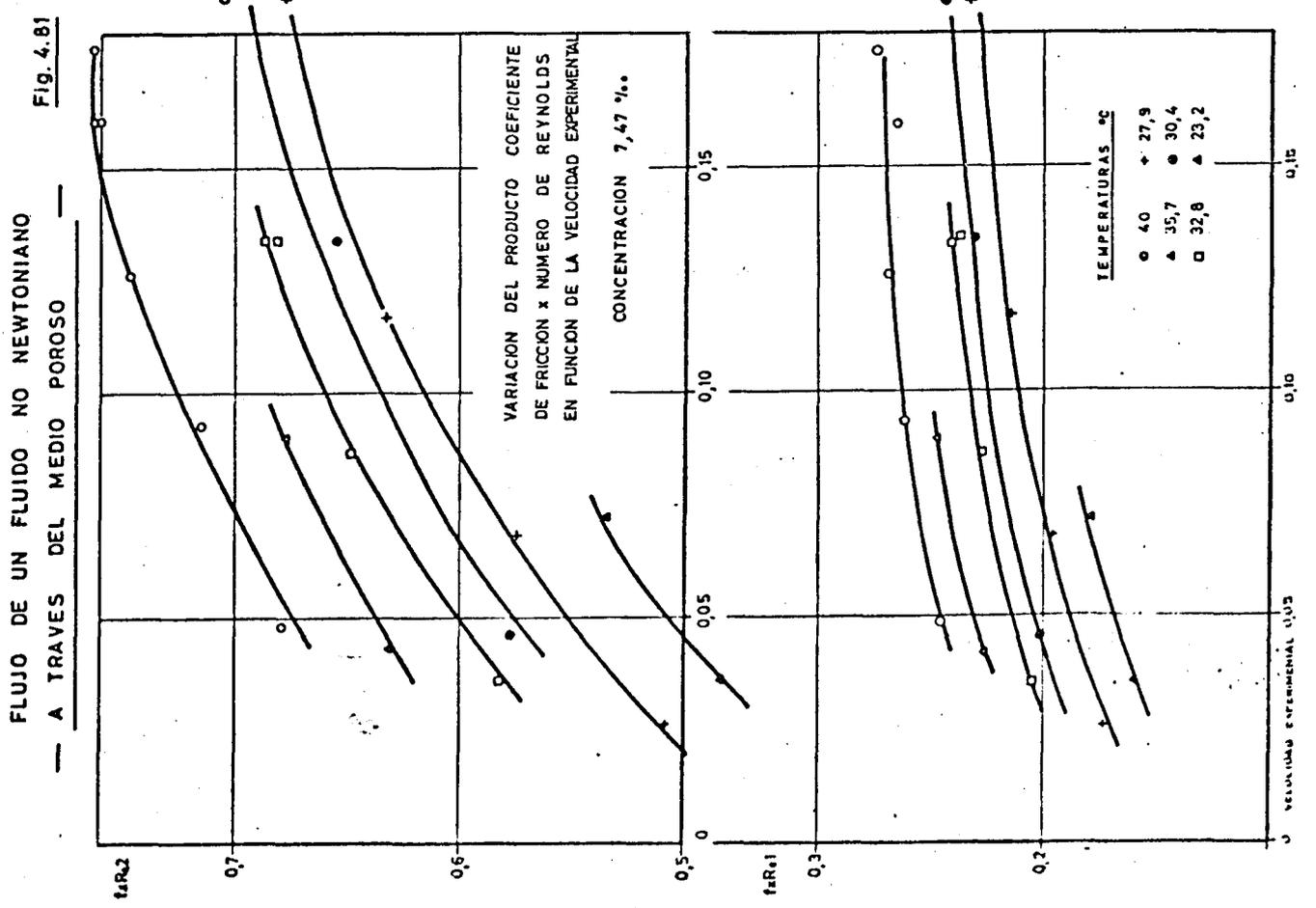
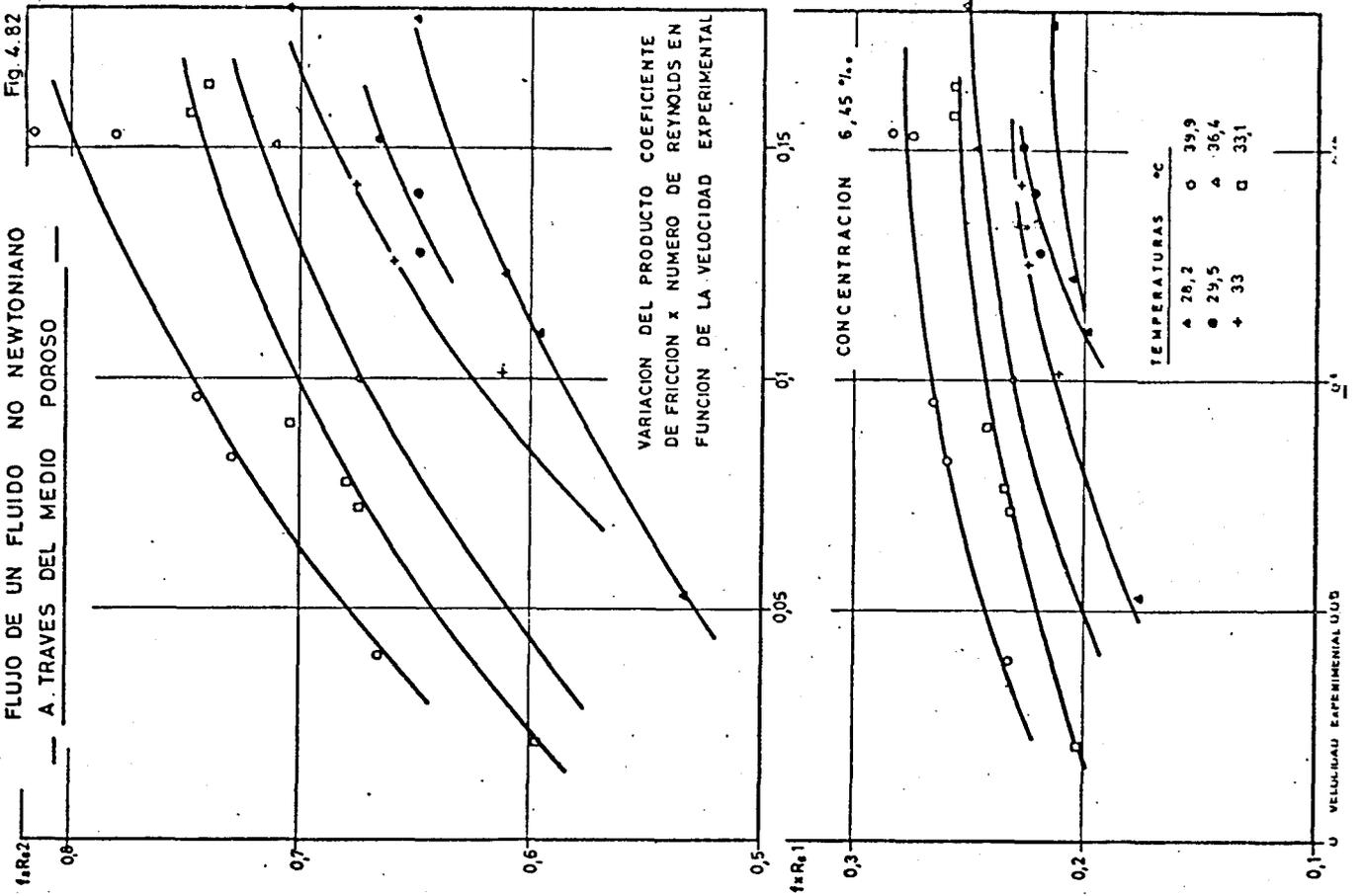


FLUJO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO
A TRAVES DEL MEDIO POROSO

Fig. 4.78







DAUBEN y MENZIE (citados en 7), para fluidos de comportamiento viscoelástico (polímero de óxido de etileno en concentraciones de 0,025 a 0,585 y diversos pesos moleculares de 0,2 a $5 \cdot 10^6$, porosidades de 0,347 + 0,392 y permeabilidades de $2,43 \pm 18 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$), encuentran un despegue de la línea de comportamiento laminar, análogo a los aquí apuntados, aunque de mayor magnitud, debido al carácter viscoelástico, evidenciado en ensayos reogoniométricos.

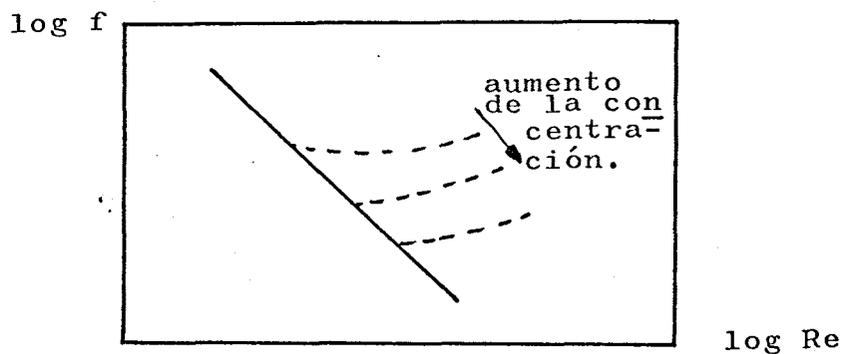


Figura 4.83.

Respecto a las variaciones con la temperatura no se encuentra ninguna cita, aunque, desde el punto de vista viscoso elástico del fluido, es análogo a una disminución de concentración.

Se puede deducir, tal y como se ha apuntado en 4.3.2.2. y 4.3.2.3., que una solución polimérica de comportamiento reométrico no complejo y en la cual no se aprecian manifestaciones de tipo viscoelástico, como el CMC disuelto en agua, puede presentar alteraciones de su comportamiento en función del medio a través del cual fluye, en este caso un medio poroso, y de la temperatura de éste.

La evolución del coeficiente de fricción f está de acuerdo con las justificaciones de la fenomenología observada hasta aquí. Un incremento de la concentración favorece la aglomeración de macromoléculas, produciendo una disminución del coeficiente de fricción. Las concentraciones bajas disminuyen el número de aglomerados facilitando el intercambio molecular soluto-solvente y aumentando el valor del coeficiente de fricción.

Las variaciones de temperaturas, al estar relacionadas directamente con la agitación molecular, dan variaciones del coeficiente en el mismo sentido.

Esta conclusión nos lleva a suponer que una solución polimérica de comportamiento pseudoplástico a través de un medio poroso puede adquirir un comportamiento viscoelástico a gradientes de velocidades elevados, debido a la aparición de acciones tridimensionales viscoelásticas factibles en esta geometría (23), y hacer crecer la pérdida de carga de una forma imprevista y muy superior a la esperada en un comportamiento pseudoplástico puro y para el caudal circulante, pudiendo aquélla alcanzar valores desmesurados (extrapolación de las gráficas experimentales 4.38 a 4.33).

Esta fenomenología, posible manifestación de viscoelasticidad, también puede interpretarse como una falta de relación entre la viscosidad aparente no newtoniana y la deducida por la caracterización reométrica. Interpretación sobre la que tenemos dudas a la vista de las correlaciones observadas en las figuras 4.68 y 4.69.

Nótese también que, iniciado el fenómeno (fig. 4.77 a 4.82), la evolución del número de REYNOLDS ya no es representativa de éste.

La realización de ensayos que completaran éstos, utilizando pesos moleculares diferentes y permeabilidades y geometrías diversas, arrojaría más luz sobre la problemática planteada y la incidencia que en ella tienen los fenómenos discutidos 4.3.2.2.

4.3.3. - CONCLUSIONES GENERALES

4.3.3.1. - DE LA PROBLEMATICA INDUSTRIAL

La encuesta realizada en el ámbito industrial, directa o indirectamente implicada con la fabricación y/o utilización de fluidos de carácter no newtoniano, ha puesto de manifiesto la existencia de un amplio espectro de problemas, asociados a las especiales peculiaridades de dichos fluidos, para cuya resolución la mayor dificultad reside en el insuficiente conocimiento que el equipo técnico responsable tiene sobre el tema y la falta de una instrumentación de laboratorio adecuada.

Los problemas de control, aplicación, manipulación y demás operaciones con este tipo de fluidos, que sean imputables al carácter no newtoniano del mismo y no a otros factores, tales como deficiencias en el proceso

y su control, admiten una solución rápida, resultado de una adaptación simple de los modelos matemáticos de flujo existentes (capilar, DARCY, OSTWALD), que se ha de apoyar en una instrumentación básica de laboratorio, instrumentación que podrá ser elemental pero adecuada (modelo del proceso, reoviscosímetros simples).

La solución definitiva y general a estos problemas, está lejos de ser abordada por la industria española, considerando su capacidad tecnológica, financiera y su tamaño, y que las raíces de esta problemática se encuentran precisamente en la propia constitución de la materia. Esta solución es a muy largo plazo y solamente -viable en el contexto de una investigación a nivel universitario.

En el capítulo IV se han ensayado las dos soluciones. De la primera se ha visto su viabilidad y en -la segunda los múltiples factores que intervienen en su estudio. De ambas se habla detalladamente en las conclusiones referentes al flujo en un medio complejo, como el poroso, de los fluidos no newtonianos de carácter pseudo-plástico. En cuanto a la falta de una normalización de -las medidas esta puede ser subsanada con la aplicación de unos criterios científicos mínimos en su planteamiento, realización y utilización. Estos criterios han de considerar la naturaleza de la materia que conforma, junto -con la geometría del derrame, el comportamiento del flujo del fluido. Estos criterios han sido aplicados en la relación de un modelo reológico (Capítulo I), en la relación y estudio de la instrumentación a emplear (Capítulo II) y en la caracterización reológica propiamente dicha (Capítulo III).

4.3.3.2. - DEL MODELO UTILIZADO

Habida cuenta del interés del ajuste funcional de los reogramas de los fluidos no newtonianos estudiados, con vistas a una formulación generalizada del flujo en el medio poroso, se ha analizado la concordancia de aquellos con los que derivan de la aplicación de las leyes de STEIGER-ORY, ELLIS y OSTWALD (parte experimental del capítulo I).

El mejor ajuste corresponde a la ley de STEIGER-ORY, no obstante, por la simplicidad de representación, la facilidad de ajuste, el amplio dominio de utilización (ley de potencias de dos parámetros función de las características de la sustancia y de su estado termodinámico), la pequeña diferencia del error de estima respecto al de los otros modelos mas complejos y la disminución de este error con la ponderación de los gradientes bajos, se ha elegido la ley de OSTWALD como representación del comportamiento pseudoplástico.

4.3.3.3. - DE LA INSTRUMENTACION EMPLEADA

Justificada la adopción del viscosímetro Ferranti, entre otros posibles aparatos, para la determinación de reogramas ; su verificación, desde el punto de vista operativo y luego del estudio sistemático de errores y origen de estos, nos lleva a concluir cuanto sigue sobre él :

- La variación de los tiempos de acelerado o de ensayo - introduce oscilaciones aleatorias en la medida de la - característica viscosa.
- El error de evaluación de la viscosidad puede llegar a ser, como máximo, de un 10%. Este valor queda limitado al 3% si se trabaja con la ampliación mínima posible.
- El error introducido por la distancia cono-plato es fá - cilmente cuantificable y, de hecho, gracias a la uni - dad de control del mismo, despreciable.
- La incidencia en la medida de otros efectos tales como: - inerciales, de borde, de centrifugado, no tiene ningun - na importancia siendo despreciables.

De todos ellos, el mas espectacular, es el - de aparición de oscilaciones del esfuerzo cortante en el reogramá. Su posible origen es el ordenamiento y/o esti - rado molecular. Su falta de incidencia en la calidad de la medida (las oscilaciones se montan sobre el reograma utilizable o efectivo y desaparecen luego de un primer - cizallado de la muestra) hace que no tenga mayor interés en este estudio.

La aparición de ciclos o bucles de histére - sis en los reogramas realizados en el FERRANTI no es atri - buible a la presencia de tixotropía en todos los casos. En nuestro estudio, fluidos newtonianos y pseudoplásticos, también aparecen, no manifestándose la tixotropía en un ensayo específico a velocidad constante en el mismo equi - po Ferranti. Su area puede ser positiva o negativa y de - pende del tiempo de ensayo y de la temperatura, en el -

sentido de disminuir al aumentar el tiempo de ensayo y - con el descenso de la temperatura y de la viscosidad del fluido; es independiente de la escala de ampliaciones - empleada y sobre un incremento relativo para los bajos - gradientes de velocidad con tiempos de ensayo pequeños y para los altos gradientes, si el tiempo de ensayo es elevado.

Parece ser, por consideraciones energéticas, que la causa predominante, pero no única, es el gradiente de temperaturas que se establece entre muestra y aparato como consecuencia de la constante de tiempo asociada a la termostatación y, además, el calor generado por disipación viscosa en el transcurso de la experiencia. - Las otras posibles causas, para nosotros desconocidas, - encuentran su razón de existencia en la dualidad positivo-negativo de las áreas del bucle de histéresis en un - mismo reograma. El fenómeno se produce independientemente del número de veces que se repite el reograma con una - misma muestra.

De lo expuesto se concluye la idoneidad del aparato, dados sus márgenes de error, sus cualidades y - posibilidades de utilización, para el estudio emprendido de caracterización de fluidos no newtonianos de carácter pseudoplástico, caracterización necesaria para el estudio del flujo

4.3.3.4. - DE LA CARACTERIZACION DE LOS FLUIDOS SEUDOPLASTICOS

La influencia de las variables de estado en los parámetros coeficiente de consistencia K e índice de pseudoplasticidad n , del modelo de OSTWALD aplicado a los fluidos pseudoplásticos a base de CMC y aque estudiados es la siguiente : en cuanto conviene al coeficiente de consistencia su valor aumenta con las concentraciones crecientes en tanto que disminuye al aumentar la temperatura, por contra, el índice de pseudoplasticidad, disminuye al aumentar la concentración y aumenta al elevarse la temperatura. De esto se desprende que a concentración constante todo incremento de temperatura significa una newtonización del flujo con una disminución importante de la viscosidad aparente. A temperatura constante se produce el mismo efecto con la disminución de la concentración. Ambas influencias encuentran su justificación cualitativa en el contexto del concepto de viscosidad (Teoría de EYRING) que se desprende de la teoría cinética de agitación molecular de los líquidos.

Por otra parte, teniendo en cuenta la expresión definidora de la viscosidad aparente y siendo en ella $n-1 = -\alpha$, por ser $n < 1$, resulta :

$$\mu_{ap} = \frac{K}{\left(\frac{du}{dy}\right)}$$

de donde se desprende que en la variación de μ_{ap} el efecto predominante es la evolución del valor de K con la temperatura y la concentración, dadas las variaciones relativas de K y del gradiente de velocidades. En conse-

cuencia, en una primera aproximación, la relación existente entre K y n a temperatura y concentración dadas es del tipo :

$$K = C \cdot B^{n-1}$$

Como quiera que las dimensiones de K son las de una viscosidad newtoniana por una potencia $(n-1)$ del tiempo, creemos que la pseudoplasticidad implica una escala de tiempos, digamos tiempos de orientación de las macromoléculas, cuyo efecto, en términos absolutos, es traducido por el valor del índice n . Así, en esta línea de pensamiento observamos que si n es igual a la unidad el fluido es newtoniano, $T^{n-1} = 1$, y el índice de consistencia se confunde con la viscosidad, si n tiende a cero caso hipotético de gran pseudoplasticidad, en el fluido se determina que $T^{n-1} = T^1$, K , índice de consistencia se desvía de la viscosidad newtoniana tomando las dimensiones de un módulo de elasticidad; es decir se solidifica y vuelve elástico. Debemos entender que en el primer caso, aunque el fluido tenga una rigidez estructural interna el incremento de la agitación molecular por elevación de la temperatura es equivalente a una escisión reversible, en el tiempo, de las macromoléculas.

Este mismo efecto de tiempo se constata en los ensayos de envejecimiento que han puesto de manifiesto la newtonización del fluido en el tiempo. El envejecimiento y escisión de las macromoléculas en la edad de preparación, da origen a unos tiempos de ordenamiento cada vez menores que en el límite serán nulos, al ser todas las moléculas simétricas y el comportamiento del fluido newtoniano. El control de esta variación temporal

ha permitido salvar el comportamiento anómalo inicial del preparado y determinar su rapidez y el tiempo de espera necesario para realizar los ensayos de flujo en condiciones reológicas controlables.

Los resultados experimentales ponen de manifiesto que tanto n como K , parámetros reológicos varían con la temperatura y la concentración. La variación observada para el coeficiente de consistencia coincide con las indicadas por THIRRIOT, BELLET, SAN-GELIN, MIZUSHINA y KURIWAKI para fluidos a base de CMC con concentraciones superiores a las aquí empleadas. Los tres primeros discrepan de los dos últimos y de lo aquí anotado en la por ellos observada no variación del índice de pseudoplasticidad con la temperatura. A nuestro entender n varía forzosamente con la temperatura y la concentración, por cuanto la no linealidad del comportamiento pseudoplástico, depende única y exclusivamente de este índice, así el tránsito de comportamiento no lineal a linealidad newtoniana se puede conseguir actuando sobre la temperatura y la concentración.

El envejecimiento ha sido puesto en evidencia, en fluidos análogos a los aquí empleados y en otros por diversos autores tales como SCOTT BLAIR, TUSKYNSKI, NEDOUNCHELLE, ACHUTZ, THIRRIOT, BELLET, SANGELIN.

En cuento al estudio analítico realizado, "estudio termodinámico", de expresiones que ponen de manifiesto las variaciones relativas y concomitantes de los parámetros empleados en función de las variables de estado. Se ha ensayado, a modo de ejemplo, la utilización de

estas expresiones para predecir el comportamiento, eligiendo las variables independientemente, y así obtener los valores de los esfuerzos cortantes originados en el flujo de forma analítica. Indudablemente este planteamiento solo es aplicable en geometrías bien definidas y si el caso lo justifica, siendo las líneas generales de su sistemática de interés en la ingeniería del estudio de fluidos, en cuanto a realización, presentación y explotación de resultados de caracterización.

4.3.3.5. - DEL FLUJO DE LOS FLUIDOS SEUDO- PLASTICOS

El planteamiento del estudio del flujo en un medio poroso se aborda con el doble objetivo de inferencia de un modelo matemático y búsqueda de leyes experimentales que lo definan.

El modelo matemático ha sido la ley de DARCY generalizada para un fluido no newtoniano de comportamiento definido por la ley de OSTWALD. Por otro lado, se ha considerado, un modelo capilar basado en el coeficiente de fricción.

En cuanto a la ley experimental su búsqueda se ha apoyado en las ya conocidas de DARCY y general de pérdidas de carga. En sí, la búsqueda se ha realizado sobre la evolución de la viscosidad aparente que presentaba el fluido en las condiciones de derrame, con el fin de compararla con la evolución de la viscosidad diferen-

cial, deducida de la caracterización reológica del fluido. De ser estas evoluciones paralelas la validez de los modelos experimentales quedará establecida.

Este planteamiento requiere un perfecto conocimiento de las características geométricas del medio poroso y reológicas del fluido, para poder proceder a la valoración de su validez y comparación entre las alternativas propuestas.

Los ensayos previos han permitido determinar, por métodos geométricos, volumétricos e hidrodinámicos, la porosidad, tortuosidad, la permeabilidad, la sección mojada, el radio hidráulico y el diámetro representativo del medio poroso (1ª parte del capítulo IV). La caracterización del fluido ha suministrado los parámetros reológicos K y n en función de la concentración y temperatura y para un tiempo dado (Capítulo III).

Determinadas las anteriores características se puede proceder al estudio experimental y a la correlación con los modelos propuestos, aquí es donde se han bajado los diversos conceptos del, por motivos denominado, coeficiente de DARCY (ψ_1 , ψ_2 , A_7), de los números de REYNOLDS, de las viscosidades diferenciales y aparentes y del coeficiente de fricción. Esta pluralidad viene de los diversos planteamientos teóricos posibles, de la información extractada de la literatura y de los métodos comparativos para observar la representatividad de los modelos establecidos respecto del fenómeno real, siguiendo el doble camino de lo teórico a lo experimental y viceversa (apartado 4.3.2.).

Previo a todo el anterior planteamiento, era obligada la inspección de los resultados experimentales brutos y/o semielaborados. Dos motivos nos han llevado a esto; uno, el seguir de manera simple la marcha de los ensayos, otro, las referencias bibliográficas que citan cambios de comportamiento fluido en el flujo a través de un medio poroso (SAVIN y otros).

De esta previa observación se corrobora las indicaciones sobre el comportamiento dadas en el capítulo III al exponer el estudio de caracterización reológica. En las figuras 4.22 a 4.27 se observan las influencias de la concentración y temperatura sobre la viscosidad aparente que ya se podían inferir del estudio de caracterización reológica. El medio poroso, a modo de reómetro de flujo axial, suministra los diversos reogramas en los que se aprecia que para una velocidad q_E (análoga al gradiente de velocidades), constante, el esfuerzo cortante promedio aparente crece con los incrementos de concentración y con las disminuciones de temperatura. Por otra parte, para concentración y temperatura dadas, el esfuerzo cortante aumenta con la velocidad experimental, en concordancia con el comportamiento pseudoplástico definido por la expresión de OSTWALD. Luego no se observa ninguna anomalía en el comportamiento del fluido respecto a su conocido carácter pseudoplástico.

La comparación de los resultados experimentales (fig. 4.28 a 4.33) con los obtenidos por aplicación de la ley de DARCY generalizada pone de manifiesto una aparente reducción de la permeabilidad intrínseca k_0 de un medio poroso por el que circula con fluido no newto-

niano. Este fenómeno, es observado en la literatura que trate de este tema. Las mismas dimensiones de la permeabilidad intrínseca (L^2) hace que no podamos admitir una variación de su valor al cambiar el fluido, por ser independiente de este. (¿dimensión de la molécula?).

El efecto de bloqueo de los poros, propuesto por diversos autores, para justificar esta aparente disminución de k_0 carece de sentido en nuestro estudio. La gelificación o absorción del fluido alrededor de las partículas, no creemos pueda dar variaciones del tamaño del poro detectables, a nivel de flujo, habida cuenta de la diferencia de tamaño entre este y la molécula del polímero. Creemos que en efecto de deformación de la molécula si que se podrá presentar en el estrechamiento-ensanchamiento-estrechamiento que recorre. Esta deformación causaría anomalías en el flujo, que expondremos más adelante, en si bastante anómalo pues sería análogo al producido alrededor de una esfera pero con interferencia de las otras situadas en el contorno.

El hecho de que la relación entre la velocidad teórica, prevista por DARCY generalizado, y la observada experimental, alcance valores superiores a la unidad, hasta 1,8, (fig. 4.36 a 4.41), resultados en acuerdo con los de otros autores (MASSARAVI KOZICKI) hasta 200 % en cuanto a la variación aunque en algún caso discrepe en lo referente a la tendencia de esta variación con el número de REYNOLDS generalizado (Fig. 4.42 y 4.43), indica que el modelo analítico del flujo, DARCY generalizado, que implica el parámetro ψ , no es satisfactorio.

El que la velocidad teórica esperada sea mayor que la experimental observada, significa que la disipación de energía en la realidad es mayor que la supuesta por el modelo teórico. El modelo de DARCY no tiene en cuenta la disipación de energía interna del propio fluido, pues solo está previsto para responder a fluidos con simetría molecular esférica y en este caso las cadenas del polímero dan al fluido un comportamiento diferente. Esta visión de la disipación energética da lugar a una nueva vía de trabajo en la que se deberá contemplar el carácter reológico y el comportamiento al flujo en función del tamaño y forma de las macromoléculas. Esta justificación propuesta del fenómeno, ignora los fenómenos de efecto pared de absorción y velocidades de deslizamiento, citadas en la literatura para explicarlo (MASSARANI, KOCINSKI, SAVINS, CMU, BURRIDGE, BROWN, LEE, CLARIDGE, MONGAR, diversos fluidos y tecnologías del petróleo).

La variación de la relación de velocidades disminuye con la velocidad experimental, con la temperatura, con la concentración y con el número de REYNOLDS, en contra de la variación indicadas por MASSARANI respecto de la temperatura y concentración y estando de acuerdo con la newtonización del fluido al producirse las variaciones de las magnitudes apuntadas.

La observación de la variación de la relación de velocidades con la velocidad experimental, la temperatura y la concentración arroja mas luz a este tema (fig. 4.36 a 4.43). La relación de velocidades aumenta con la temperatura para una misma velocidad experimental y concentración, decrece con el aumento de concentración para

temperatura y velocidad experimental definida. Esto se puede justificar como que la viscosidad aparente, coeficiente ψ , definida y tomada para el cálculo de la velocidad teórica, introduce variaciones asociadas a la disminución de esta viscosidad con el incremento de la temperatura y la disminución de la concentración que no se producen en la realidad, y posiblemente debido al efecto antagónico que suponen las variaciones de la concentración (anisotropía) y del número de REYNOLDS (turbulencia local) y reflejados en su incidencia en la relación de velocidades (fig. 4.46 a 4.56).

Se han expuesto pluralidad de fenómenos que a nivel de enlace molecular, de las mismas moléculas, de sus posibles asociaciones en cristales o partículas, de su posible deformación, de los efectos hidrodinámicos del flujo sobre las anteriores, y la posibilidad de un derrame complejo darían estas variaciones. Muchas de ellas escapan a este estudio de carácter mecánico, unos por naturaleza molecular otros por su origen en un comportamiento elástico, que aunque puesto de manifiesto en el flujo a través del medio poroso, no es detectable en la instrumentación disponible hoy en día y que, por lo tanto, imposibilitan la utilización del número de DEBORAH a estos niveles de concentraciones estudiadas.

Los efectos de comportamiento sólido (fricción, elasticidad) parecen factibles, por formación de unidades reológicas, con origen diversos que podrían dar una fenomenología no lineal dada la complejidad del flujo a dos escalas. El encontrarnos frente a un doble flujo no uniforme de un fluido heterogéneo, sería otra de los

motivos de estas anomalías (apelotonamiento, valvuleo, -ordenamiento molecular, vorticidad, turbulencia local), que proporcionan un tensor esfuerzos modificado. Toda es ta fenomenología, compleja, desemboca en un incumplimiento de las hipótesis establecidas para la ley generalizada de DARCY y una invalidación de esta para este tipo de fluido y flujo.

Una última búsqueda de cierto paralelismo entre el fenómeno real y el descrito por el modelo generalizado de DARCY se ha realizado el cálculo del índice de pseudoplasticidad y coeficiente ψ necesarias para que el modelo generalizado respondiera al comportamiento real. Las figuras 4.58 y 4.59 comparan estos valores con los -obtenidos de los ensayos reométricos y a partir de éstos. Se puede observar una evolución funcional paralela del -parámetro ψ , salvando efectos de escala, paralelismo -proviniente de una aparente newtonianización del fluido -pues los índices de pseudoplasticidad requeridos para el ajuste son mayores que los obtenidos en la reometría. Es ta aparente newtonización se habría observado en las figuras 4.28 a 4.33 y consultado en las figuras 4.52 a 4.55 y se justifica por la menor interacción molecular que su pere la formación de ovillos reológicos.

Otro planteamiento posible es adoptar el índice de pseudoplasticidad, dato reométrico, y calcular el valor del coeficiente, ψ ahora denominado A7 de la ley de DARCY generalizada, que permite a esta representar los -fenómenos reales. Los resultados se han graficado en las figuras 4.60 a 4.67. La evolución del coeficiente A7 con el número de REYNOLDS, con la temperatura y con la con-

centración es de forma compleja. De los valores disponibles, no se puede sacar una conclusión respecto a la aplicabilidad y establecimiento, a partir de una forma analítica, de los valores de A_7 , dada la pluralidad de variables que en su definición intervienen.

El hecho de que la fenomenología real no sea seguida por la evolución del modelo teórico. (fig. 4.28 a 4.33 y 4.52 a 4.55), de que la naturaleza del fluido invalide las hipótesis establecidas, de que la existencia de un paralelismo entre el modelo teórico y la realidad sea a costa de una pérdida de significado de los parámetros reológicos (aparente newtonización) obtenidos en el estudio de caracterización reológica (fig. 4.58 y 4.59) y de que la utilización de estos parámetros deja sin valor el modelo generalizado (fig. 4.60 a 4.67) nos obliga a desechar la ley de DARCY generalizada y a apoyarnos en modelos mas simples para el planteamiento del estudio del flujo.

Llegados a este punto, nos restan dos modelos simples y utilizables que son ! la ley de DARCY sin generalizar y el modelo capilar deducido de la ley general de pérdidas de carga. Ambas son las enunciadas leyes de tipo experimental que, de forma rápida y dentro de un planteamiento industrial, permiten dar una solución al estudio del flujo.

En ambos casos, ley de DARCY y modelo capilar, se han definido las viscosidades equivalentes a partir de los resultados experimentales. Estas viscosidades se comparan con la diferencial calculada a partir del

modelo de OSTWALD y según los resultados de caracterización del fluido. Las dos primeras viscosidades presentan una analogía de definición pues provienen de un modelo de flujo, la última se deduce de los reogramas obtenidos en la caracterización. En la fig. 4,68 y 4.69 se ha observado la fuerte correlación que existe entre estas viscosidades, el paralelismo de sus valores es manifiesto para concentraciones, temperaturas y velocidades experimentales diversas.

Este paralelismo existente entre las viscosidades aparentes que muestra el flujo y la deducida de las características reológicas nos muestra la utilidad de estas dos leyes, DARCY y modelo capilar, para el planteamiento del flujo, partiendo de los parámetros reológicos n y K , y conociendo la geometría y permeabilidad aparente del medio. La validez de estos y las desviaciones observadas en la ley de DARCY generalizada, nos hacen poner en cuestión esta última, salvo en los casos que su bondad y aproximado comportamiento sean manifiestos. Por contra la generalidad de aplicación de la expresión universal de pérdidas de cargas de DARCY-WEISBACH nos lleva a incidir en el interés de un estudio basado en las magnitudes que intervienen en el fenómeno (análisis dimensional).

En el apartado 4.3.2.4. se ha expuesto el establecimiento de una analogía capilar, su objetivo ha sido la determinación del coeficiente de fricción. El análisis dimensional nos suministra el número de REYNOLDS - Re_1 y la literatura el Re_2 , ambos, a su vez pueden modificarse consiguiendo la velocidad de DARCY para obtener su valor medio en el poro, dividiéndolos por m^{2-n} , todas

las definiciones son análogas y siguen evoluciones paralelas. Se ha seleccionado el Re_l por suministrar valores mas bajos y ser algo mas sensible, en las representaciones gráficas, a la variación de las magnitudes que lo definen.

Las figuras 4.70 a 4.75 y 4.76 nos muestran la linealidad entre el coeficiente de función experimental y el logaritmo del número de REYNOLDS. El campo de variación del número de REYNOLDS es amplio y siempre en la zona de régimen laminar y reteniéndose la conocida relación :

$$f = \frac{cte}{Re}$$

siendo el valor de la constante función de las correcciones realizadas a partir de los parámetros característicos tales como tortuosidad, radio hidráulico, permeabilidad, etc.

De la ley de DARCY simple y del número modelo capilar se deduce que : $f \cdot Re = cte$, en zona de trabajo. En las figuras 4.77 a 4.82 se representa el valor de este producto, adimensional, en función de la velocidad experimental. ¿ Se puede interpretar esta evolución del coeficiente de fricción como un comportamiento viscoelástico?. De ser así, el comportamiento se debe a fenomenología expuesta anteriormente y originada en la estructura molecular del fluido y a la complejidad del medio poroso. Desde nuestro punto de vista, todo lo que significa esta evolución es, que se ha de analizar según un modelo de pérdidas de carga y no según un modelo de DARCY y esta viscosidad aparente se debe a un fenómeno -

de enrollamiento - desenrollante - ordenación - desordenación análogo a la fenomenología viscoelástica, fenomenología acorde con la justificación de las evoluciones - de la relación de velocidades (fig. 4.36 a 4.41) en la - que se ha expuesto que el incremento de concentración su pone un aumento de la disipación de energía, es decir, y aunque no sea muy significativo, una mayor probabilidad de que las macromoléculas se enrollen y desenrollen y - de un comportamiento de tipo viscoelástico. Si el incremento es de temperatura, el fenómeno se reproduce al - igual que si disminuyera la concentración, como si las - partículas emigraran con mas facilidad al contorno.

El comportamiento de un fluido heterogéneo, por diferencia en tamaño y forma de las moléculas del so luto y del solvente, puede verse considerablemente afectada por la incidencia de la escala del dominio de flujo sobre cada una de las partes.

La pluralidad de efectos, citados en 4.2.2., que intervienen en el fenómeno, se manifiestan gracias a la geometría compleja del medio poroso, geometría que afec tando al derrame a un nivel microscópico, da lugar a una multiplicación en número de los fenómenos a escala molecular, a un flujo no uniforme de configuraciones espaciales (como las formadas en el flujo de la pasta de papel) configuraciones capaces de manifestaciones de tipo sólido (elásticas) por lo que se ha de considerar que :

- los fluidos complejos tienen comportamientos diferentes en función de la escala del flujo.

- el soluto puede modificar el comportamiento inercial - del fluido considerando homogéneo, si se suceden aceleraciones y deceleraciones, perdiendo entonces significado el número de REYNOLDS, crítico.

- números tales como los de DEBORHA, WEISSEMBER y otros que traduzcan la influencia de las estructuras y magnitudes moleculares presentes, de las escalas de tiempos propia a estos y las del proceso (función de la geometría), deberían de considerarse en el estudio del flujo para complementar y tomar el relevo de la significación del número de REYNOLDS.

- no hay, hoy en día, reómetro, ni un modelo de comportamiento fluido, ni una expresión del flujo que sean a la vez definitivos y general en su concepción y utilización.

Estas consideraciones dejan abierto los caminos de investigación expuestos en este estudio y que - arrojarían luz sobre la problemática. Problemática que aun no estando resuelta es salvable a un nivel industrial pues aunque la instrumentación reométrica no es capaz, - dada su concepción y realización, de suministrar los parámetros viscosos y elásticos que definen el comportamiento de un fluido en todas las situaciones, da los parámetros reológicos, función de la ley de comportamiento seleccionada. Estos parámetros se emplean con buenos resultados en los modelos de flujo simples, tales como el capilar y el de DARCY no generalizado, puesto que la caracterización geométrica del medio sigue siendo válida y se producen manifestaciones viscosas, ligado a la confi-

guración de evolución paralela y por lo tanto íntimamente relacionadas a la de la viscosidad definida a partir de los parámetros reológicos y ley reológica adoptada.

De esta forma creemos haber cubierto el objetivo industrial planteado al inicio de este trabajo y - contribuido en el vasto campo de las investigaciones de esta nueva ciencia.

NOMENCLATURA

CAPITULO IV Y ANEJOS

p, p_1, p_2, p^*, p_m	Presión en un punto, en puntos dados, motriz, media.
t	Tiempo.
ρ	Densidad del fluido
$\vec{v}, v_x, v_y, v_z, \vec{q},$ v_ϕ, v_r, v_s, v	Vector velocidad del fluido, según coordenadas, cartesianas, de filtración o de DARCY, según coordenadas cilíndricas, de deslizamiento, media.
$\vec{\sigma}, \vec{\sigma}^*$	Tensor tensión o de esfuerzos.
τ	Esfuerzo cortante.
\vec{F}	Fuerzas exteriores por unidad de masa.
λ, μ	Coefficientes de LAME.
θ	Velocidad de deformación de volumen.
T	Temperatura.
$x, y, z,$	Coordenadas cartesianas.
S_f, S_{fs}, S_{ff}, S	Superficie que limita al fluido, de la interfase sólido-fluido, en la interfase fluido-fluido, superficie o sección de paso.
$\alpha(x)$	Función espacial.
m	Porosidad.
V, V_f	Volumen, volumen fluido.

$\underline{\underline{I}}$	Tensor unidad.
A	Fuerzas del sólido sobre el fluido por unidad de volumen de fluido.
q,r	Funciones.
$\underline{\underline{k}}$	Tensor permeabilidad.
k_o, k, k_g	Permeabilidad intrínseca, relativa, a un gas.
Q, Q_m	Caudal, caudal másico.
$\mu, \mu_o, \mu_c, \mu_N,$ $\mu_{dif}, \mu_{ap}, \mu_{ef}$	Viscosidad, de la expresión de DARCY no generalizada, de la analogía capilar o newtoniana, diferencial y aparente del modelo de OSTWALD, efectiva.
g	Aceleración de la gravedad.
l, L, ΔL	Longitud, del medio poroso, incremento.
ρ	Peso específico.
i	Gradiente hidráulico.
h	Distancia vertical.
$d_{10}, d_{50}, d_{70},$ d, D, d_{VSM}	Diámetro del tamiz que deja pasar un - total del 10,50,70% de partículas, de la partícula, del modelo del medio poroso, medio de la partícula relativo - al volumen específico.
$\alpha, \beta, \gamma,$ a,b,c	Constantes o funciones empleadas.
R	Constante de los gases.
K, K'	Coeficiente de consistencia.
n	Indice de pseudoplasticidad.

\bar{D}	Derivada del tensor gradiente de velocidades.
ϕ, r, z	Coordenadas cilíndricas.
$\psi, \psi_1, \psi_2, A_7$	Funciones definidas coeficiente de la ley de DARCY generalizada.
t'	Tortuosidad.
ϕ	Función de la geometría.
f	Coefficiente de fricción.
R_H, R'_H, R	Radio hidráulico, equivalente del medio poroso.
ΔH	Incremento de la carga hidráulica.
Re, Re_1, Re_2, Re_K	Número de REYNOLDS, diversas expresiones
De	Número de DEBORAH.
θ_f	Tiempo de relajamiento del fluido.
θ_p	Tiempo del proceso o de residencia.

BIBLIOGRAFIA

1. - ARAVIN Y NUMEROV. "Theory of fluid flow in indeformable porous media" Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem 1965.
2. - ARDNOFSKY, STEIN y WALUC. "A new metode of evaluating porosity and alipcorrected permeability" Soik Science 15, vol 79, p 45, 1.948.
3. - BIRD, STEWART, LIGHFODT. "Transport Phenomena" John Wilcy and Sns suc, N.Y. 1.960.
4. - BCAND. "Mathematical Theory of flow of gas in a porous colod and of associated temperature distributions" Proce dius of Royal Society London A221. 1954.
5. - CASTANY. "Traité pratique des eaux souterraines" DONOD. 1.967.
6. - CHAUVETEAU. "Essai sir la lei de DARCY et les ecaulements laminaires à parte de charge non lineaire". Thése Fac. Sci. Toulouse. 1.965.
7. - SAVINS. "Non newtonian floe through porous media".
8. - CHRISTOPHER, MIDDLEMAN. "Pouer-law flow throught a - pached tube".
9. - I.E.C.F. Fundamentals vol. 4 n^o 4 p. 422, 1.965.

10. - COLLINS. "Flow of fluids through porous materials" Reinhold, Aveurical Engineering Series, London - 1.961.
11. - DAUBEN, MENZIE. "Flow of polyer solutions through porous media" Petroleum trassactions of the society of Petroleum Eusineams. Agoust p. 1.065, 1.967.
12. - FOSTER, MEMILLEN, ODEH. "The equation of fluids, in porous medios, prorogativa velocity of pressu- res pulses" Society of Petroleum Enginevformal p. 333. 12-1.967.
13. - GAITOWDE, MIDDLEMAN. "Flow of viscolastic fluids - through porous media" I.E.C. Fundamentals vol. 6 - nº 1 p.145, 1.967.
14. - GREGORY. "Now newtonian polymeric flow through po- rous media" Ph. D. Thesis, Virginia Polytechnie - Institute. 1.966.
15. - HABIB, THIRRIOT. "Ecartis a la lei de Darcy pour - les ecoulements d'eau à faible vitesse dans les - argiles" 13^{eme} Congres de l'A.I.R.H., Kyoto, Japan, Sept. 1.969.
16. - HANTUSH 1964. "Advances in Hidroscience. vol. 1 p. 282-430. Academic Press N.Y.
17. - HARR 1.962. "Ground water and seepage" Mc. Graw - Hill.

18. - MIRSCH. "Flow of gases through porous media in the region between molecular and viscous conditions". *Juimol of Apl. Phisc.* vol. 32. n^o 6 p. 977 1.961.
19. - HUBBERT. "Darcy'S law and the field aquations of - flow of underground fluids". *Trans. Amer. Inst. - Niech. Engris. (Petr. Trnas).* vol. 207, p.222, - 1.956.
20. - KATZ. "Handbook of natural gas engineering". Mc. Graw-Hill N.Y. 1.959.
21. - LEW, FUNG. "Formulation of stratostical equation - of motsan of viscous fluid in a anisotropie non ri gid porous solid" *Int. J. Solids Structure* vol. 6 p. 1323, 1.970.
22. - MARLE. "Ecoulement monophasiques en milieux poreux" *Ron. Inst. Franç du Petrole.* vol. XXIII n^o 10, p. 1471. 1.967.
23. - MARSHALL, METZNER. "Flow of viscoelastic fluids - through porous media". *I.E.C. Fundamentals.* vol 6. n^o 3 p.393, 1:962.
24. - MASSARANI. "Generalisation de la loi de Darcy" *Thè se Fac. Sci.* 1.971.
25. - METHERON. "Elements pour une theorie des milieux - Poreux". *Masson et Cie.* 1.967.
26. - MC. KINLEY, JAHNS, HARRIS, GREENKORN. "Non newto- nian flow in porous media" *AICME Journal*, vol. 12, n^o 1, p 17. 1.966.

27. - "Physical principles of oil productions". Mc. Graw Hiel. N.Y. 1.949.
28. - POLUBARINOVA-KOCHINA, 1.962. The Theory of ground water mouvement. Princenton University Press, 281-283 pp.
29. - PRESENT. "Kimetic theory of gases". Mc. Graw-Hill N.Y. 1.958.
30. - SADOWSKI. "Non newtonian flow through porous media" Dh.D. Thesis University of Wisconsin. 1.963.
31. - SCHEIDEGGER. "The phisica of flow through porous me dia". Univ. Toronto Press. 1.960.
32. - SCHEEBELLI. "Hydraulique Souterraine". Eyrolle, - 1.966.
33. - SISCOVIC, BRISKEY, GREGORY. "Viscoelastic behavior of molter polymer in porous media". AICME 62 anual meeting. Washington. Nov. 1.969.
34. - SLATTERY. "Flow of viscoelastic fluids through me dia". AICME journal, vol. 13, n^o 6 p. 1066, 1.967. "Single-phase flow through porous media". idem. - vol. 15, n^o 6, p. 666. 1.969.
35. - SZEKEZY, CARR. "On nonisothermal flow of gases - through pactied beds". Trans. of the metallurgical Somety of AIME. vol. 212. p. 918. 1.968.
36. - VAN WAZER, LYONS, COLNELL. "Viscosity and flow - mouvement". Inters. Publishers. N.Y. 1.966.

37. - WHITAKER. "The equations of motion in porous media"
Chem. Eng. Scienc. vol. 21. p. 291. 1.966.
38. - WRIGHT. "Non linear flow through granular media"
Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of
A.S.C.E. vol. 94, nº 444 p. 851, Jai. 1.968.
39. - LINQUIST. "1^{er} Congrès des Grands Barrays, Stockholm
1.933.
40. - CHRISTOPHER-MIDDLEMAN. "Ind. Eng. Chem. Fundam, 4,
422. 1.965.
41. - GREGORY, GRISKEY. "A.I. ch. E.I., 13 (1), 122.
1.968.
42. - KOZICKI, HSU-TIU. "C. Chem. Eng. Sci. 22, 487. 1.968.
43. - ERGUN. "Chem Eng. Prog." 48,89. 1.952.
44. - GOGARTY W.B. Trans. Soc. Petrol. Engr. 240. Parte
7, (5). 1.967.
45. - KAY. "Introducción a la mecánica de los fluidos y
transferencia de calor". Ed. Marcombo.
46. - WILKINSON. "Non newtonian fluids" Pergamen Press.