

Tesis de Posgrado

Transferencia de materia en lechos de mallas con fluidos no - newtonianos

Coppola, Liliana

1984

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Coppola, Liliana. (1984). Transferencia de materia en lechos de mallas con fluidos no - newtonianos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1824_Coppola.pdf

Cita tipo Chicago:

Coppola, Liliana. "Transferencia de materia en lechos de mallas con fluidos no - newtonianos". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1984. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1824_Coppola.pdf

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Tema de Tesis

TRANSFERENCIA DE MATERIA EN LECHOS DE MALLAS CON
FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Autor

Liliana Coppola

Director de Tesis

Dra. Ursula Böhm de Bordenave

Lugar de trabajo:

Departamento de Industrias

Tesis presentada para optar al título de Doctor en
Ciencias Químicas

1984

1824
Ej. 2

A mi esposo e hijas

A mis padres

Agradecimientos

A la Dra. Ursula B. de Bordenave por la dirección de este trabajo.

Al Dr. Rubén D. Tonini por asistir y orientar la realización del mismo.

A la Dra. Isabel A. Nieva por la colaboración prestada durante el desarrollo del trabajo experimental.

Al Lic. Mauricio R. Remorino por las valiosas sugerencias y el apoyo brindado en el transcurso de esta investigación.

Indice

	Página
Introducción	1
<u>Cápitulo I</u>	
Caracterización de soluciones de polímeros	3
1. Objetivos	4
2. Selección del polímero	5
3. Caracterización de soluciones que contienen PAA AP-30	6
3.1. Comportamiento reológico	6
3.2. Determinación de los coeficientes de difusión	8
3.2.1. Descripción del método electroquímico	8
3.2.2. Fundamento del método de determinación	10
3.2.3. Descripción del equipo	11
3.2.4. Circuito eléctrico	14
3.2.5. Experiencias realizadas	14
3.3. Conclusiones	17
4. Caracterización de las soluciones que contienen CMC	20
4.1. Comportamiento reológico	20
4.2. Difusividad	21
4.3. Conclusiones	32
5. Recopilación bibliográfica	33

6. Mediciones realizadas con electrodos de disco	40
7. Conclusiones	45

Capítulo II

Transferencia de materia a una malla	46
1. Objetivos	47
2. Parte experimental	48
2.1. Método de determinación de coeficiente de transferencia	48
2.2. Propiedades de los electrolitos utilizados	48
2.3. Descripción del equipo	48
2.4. Circuito eléctrico	50
2.5. Caracterización de las mallas	50
2.6. Experiencias realizadas	52
3. Resultados	55
4. Conclusiones	70

Capítulo III

Transferencia de materia en lechos de mallas	71
1. Objetivos	72
2. Parte experimental	73
3. Resultados	80
4. Conclusiones	96

Conclusiones Generales	97
------------------------	----

Tablas	99
--------	----

Notación	106
----------	-----

Bibliografía	109
--------------	-----

Introducción

En los últimos años ha cobrado trascendencia el estudio de la circulación de fluidos no-Newtonianos a través de sistemas con partículas, debido a su aplicación en muchas áreas. Por ejemplo, interviene en la ingeniería cerámica, en la filtración de soluciones de polímeros y suspensiones, en el movimiento de soluciones acuosas de polímeros a través de arena en operaciones de recuperación secundaria de petróleo y en el flujo de líquidos no-Newtonianos a través de lechos de intercambio iónico.

Los fenómenos de transferencia de calor y materia en flujo de fluidos no-Newtonianos a través de tubos u otras geometrías sencillas han sido investigados recientemente en varios artículos debido al uso frecuente de este tipo de fluidos en la industria moderna. Sin embargo, a pesar de su importancia industrial, solamente se han hecho unos pocos trabajos sobre la transferencia de calor y materia desde fluidos no-Newtonianos fluyendo a través de lechos rellenos fijos y fluidizados. Entre ellos se puede citar a Kumar y Upadhyay (1981), Tonini, Böhm y Brea (1981) y Kawase y Ulbrecht (1983).

De la revisión de la bibliografía disponible está claro que los estudios anteriores en lechos rellenos están limitados, en su mayoría, a partículas esféricas.

Teniendo en cuenta el constante incremento en la producción y procesamiento de los fluidos no-Newtonianos, hay una necesidad de continuar investigando en este campo; por ejemplo las mallas son un tipo de relleno que presenta un área específica elevada, por lo cual son usadas frecuentemente en reactores catalíticos, especialmente cuando el catalizador es

muy caro, como el platino.

Es el objetivo de este trabajo, estudiar el efecto reológico de fluidos que responden a la ley de la potencia sobre la transferencia de materia en lechos rellenos de mallas.

El modelo de la ley de la potencia, comprende a un grupo de fluidos clasificados como no-Newtonianos independientes del tiempo. El modelo también puede abarcar a los fluidos Newtonianos en virtud de su expresión del esfuerzo de corte en términos de la velocidad de deformación.

Para vincular el proceso de transferencia de materia con las propiedades no-Newtonianas de los fluidos, es preciso conocer el mecanismo del flujo a través del medio poroso. El flujo de fluidos Newtonianos a través de lechos fue objeto, en el pasado, de numerosas investigaciones. Ellas resultaron en la obtención de la ecuación de Ergun que ha sido adaptada y verificada para distintos sistemas. Pero, no hay hasta el momento solución general al problema del flujo no-Newtoniano a través de tales lechos. El presente trabajo está dirigido a adaptar las relaciones conocidas de forma tal que nos permitan interpretar los resultados experimentales de la transferencia de materia en lechos de mallas.

El trabajo experimental consistirá en la determinación de los coeficientes de transferencia de materia para lechos de mallas con distintos fluidos, incluyendo fluidos no-Newtonianos, para lo cual se utilizará la técnica electroquímica.

Capítulo I

Caracterización de soluciones de polímeros

1. Objetivos

El objetivo de las experiencias que se detallan en este capítulo era seleccionar un polímero para ser usado como espesante en las soluciones que se emplearían en el estudio de transferencia de materia en lechos rellenos de mallas (ver Capítulos II y III).

Se trató de elegir un polímero adecuado para cumplir esa función en base a las características reológicas de las soluciones y a la difusividad del ión a transferir, es decir las propiedades que intervienen o influyen en la velocidad de transferencia de materia.

Para ello fue necesario hacer mediciones de tales propiedades.

2. Selección del polímero

En el inicio de este trabajo los dos polímeros a los que se podía acceder eran: la sal sódica de la carboximetilcelulosa (CMC), de marca ROSENCO o BDH y la poliacrilamida (PAA AP-30) suministrada por DOW.

Con respecto a la primera de ellas, se tenía información sobre su comportamiento a través de los trabajos realizados anteriormente por Arvia y col. (1968), Tonini, Remorino y Brea (1978) y Tonini (1981) demostrándose que puede ser usada como espesante de las soluciones de electrolitos empleadas en la técnica electroquímica.

Con respecto a la segunda, se decidió determinar las características físicoquímicas de sus soluciones con el fin de comprobar su utilidad como espesante en las mediciones de coeficientes de transferencia de materia.

3. Caracterización de soluciones que contienen PAA AP-30

Debido a que estas soluciones serían empleadas en un estudio de transferencia de materia por el método electroquímico (Capítulos II y III), se eligió el par ferricianuro de potasio-ferrocianuro de potasio en cantidades equimolares. Llevan como electrolito soporte, una mezcla equimolar de carbonato de sodio y bicarbonato de sodio que hacen despreciable el flujo por migración de los iones que intervienen en la reacción y además contienen una pequeña cantidad de PAA AP-30 como espesante, que otorga a las soluciones características no-Newtonianas aún a bajas concentraciones.

Las drogas que se utilizaron son de pureza P.A.

Se ensayaron soluciones al 1% en PAA AP-30 a distintas temperaturas.

3.1. Comportamiento reológico

Las características reológicas de las soluciones se determinaron con un viscosímetro rotacional de cono y plato marca Ferranti-Shirley, con el cual se obtuvieron valores de τ y $\dot{\gamma}$.

La solución estudiada resulta ser un fluido que responde al modelo Ostwald de Waele, o sea a la ley de la potencia, es decir:

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

Los parámetros K y n se obtuvieron a partir de las curvas reológicas (fig. I-1) donde las mediciones realizadas se grafican en la forma $\ln \tau$ vs $\ln \dot{\gamma}$ para la solución a distintas temperaturas. Los valores de K y n así

///

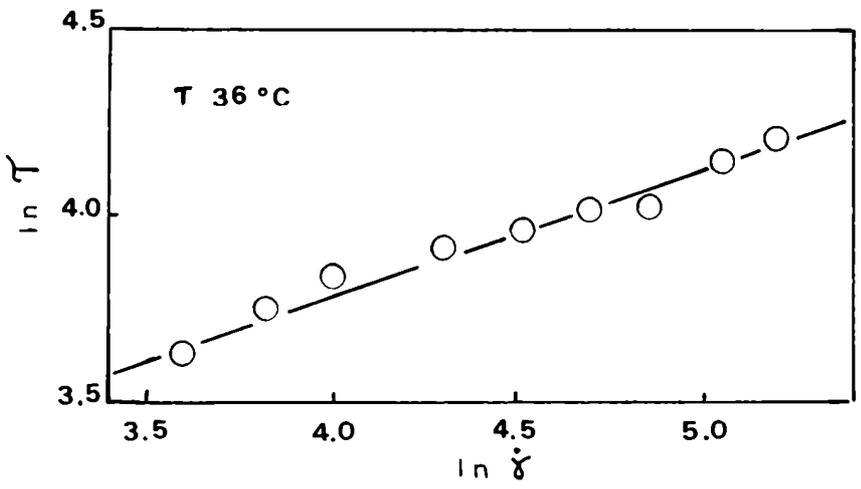
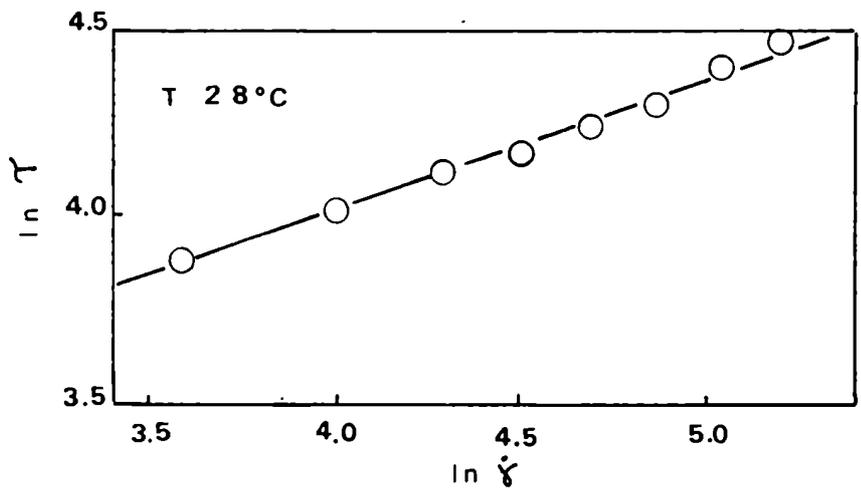
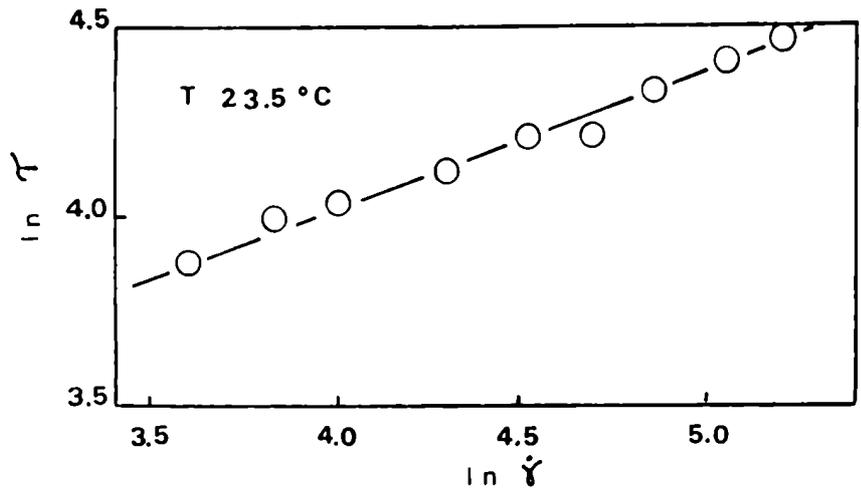


fig. I-1

obtenidos se muestran en la Tabla I.

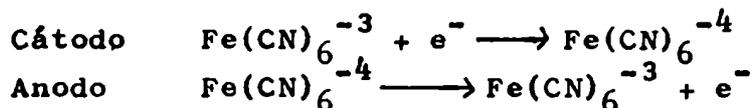
3.2. Determinación de los coeficientes de difusión

Para la determinación de los coeficientes de difusión del ión reactivo se empleó la técnica electroquímica.

3.2.1. Descripción del método electroquímico

Este método está basado en la medición de la corriente que circula por una celda y que es proporcional a una potencia del coeficiente de difusión del ión reaccionante.

En el caso de las soluciones elegidas en este trabajo las reacciones redox que ocurren en los electrodos son:



La velocidad de la reacción está determinada por lo menos por dos etapas, que son: la transferencia de los iones desde el seno de la solución a la superficie del electrodo y la reacción propiamente dicha que tiene lugar sobre la superficie del mismo. Si la velocidad de esta última es muy grande, es decir, que todos los iones que llegan a la superficie del electrodo reaccionan instantáneamente, entonces la velocidad de la reacción estará controlada por la velocidad de difusión de los iones.

La concentración de la cupla ferricianuro-ferrocianuro en el seno de la solución permanece constante por-

///

que las reacciones en los electrodos consumen y producen cantidades equimolares de cada especie.

Usando un contraelectrodo que tiene un área mucho mayor que la del electrodo de trabajo, la corriente que circula por la celda está controlada por la reacción que ocurre en este último.

En este caso se eligió la reducción del ferricianuro (reacción catódica).

El flujo del ión ferricianuro hacia la superficie del electrodo está relacionado con la corriente que circula por la celda, por la ecuación:

$$N = \frac{I}{Z F A} \quad (I-2)$$

Desde el punto de vista del proceso difusivo, se puede definir un coeficiente de transferencia de materia, tal que:

$$N = k(c_o - c_w) \quad (I-3)$$

Cuando la velocidad de reacción sobre la superficie del cátodo es tan rápida que c_w puede considerarse despreciable ($c_w \approx 0$), se tiene el flujo de materia máximo en el electrodo. En este caso la corriente que circula se llama corriente límite y su relación con el coeficiente de transferencia de materia está dada por:

$$k = \frac{I_1}{Z F A c_o} = \frac{j_1}{Z F c_o} \quad (I-4)$$

///

Las experiencias consistieron en determinar las curvas de polarización para encontrar el rango de potencial en el cual c_w se hace despreciable, y en esas condiciones, medir la corriente límite.

Las soluciones se saturan con nitrógeno, para evitar que la reacción de reducción del oxígeno disuelto compita con la reacción que nos interesa y en consecuencia, interfiera en las mediciones.

3.2.2. Fundamento del método de determinación

La solución desarrollada por Lévêque (1928) para el coeficiente de transferencia de calor en flujo laminar en tubos ha sido expresada en términos de transferencia de materia por Ross y Wragg (1965) en la forma:

$$Sh' = \frac{k d_t}{D} = 1,614 \left(Re Sc \frac{d_t}{L} \right)^{1/3} \quad (I-5)$$

válida para las siguientes condiciones:

- a) propiedades del fluido constantes.
- b) experiencias potencioestáticas lo que trae como consecuencia concentración del ión reactivo constante en la superficie del electrodo.
- c) concentración de electrolito constante en el seno de la solución.
- d) transferencia de materia controlada por difusión convectiva.
- e) perfil de velocidades en las cercanías de la pared aproximadamente lineal.

///

La ecuación (I-5) describe satisfactoriamente la transferencia de materia en una celda de flujo de sección circular.

Tonini, Remorino y Brea (1978) extendieron su aplicación, al caso de fluidos no-Newtonianos, expresando convenientemente la ecuación (I-5) en función de los parámetros K y n de la ley de la potencia, obteniendo:

$$I_1 = Z F c_o A 1,614 \left(\frac{3n + 1}{4n}\right)^{1/3} \left(\frac{U_m d_t^2}{L \mathcal{D}}\right)^{1/3} \frac{\mathcal{D}}{d_t} \quad (I-6)$$

de la cual haciendo los correspondientes reemplazos y reordenando, se puede llegar a:

$$\mathcal{D} = ((I_1/Q)^{1/3}) / Z F c_o 5,496 L^{2/3} \left(\frac{3n + 1}{4n}\right)^{1/3}^{3/2} \quad (I-7)$$

que permite calcular el coeficiente de difusión a partir de datos de I_1 y caudal medidos.

3.2.3. Descripción del equipo

El sistema utilizado, fue una celda de flujo que consiste en un tubo vertical a través del cual circula el fluido contenido en un recipiente colocado en la parte superior del tubo. Los electrodos que se usaron eran de níquel, dispuestos de manera tal que formaban parte de la pared del tubo, encontrándose el ánodo aguas abajo del cátodo. El flujo del electrolito se regula con una válvula colocada en el extremo inferior del tubo (figs. I-2 y I-3).

///

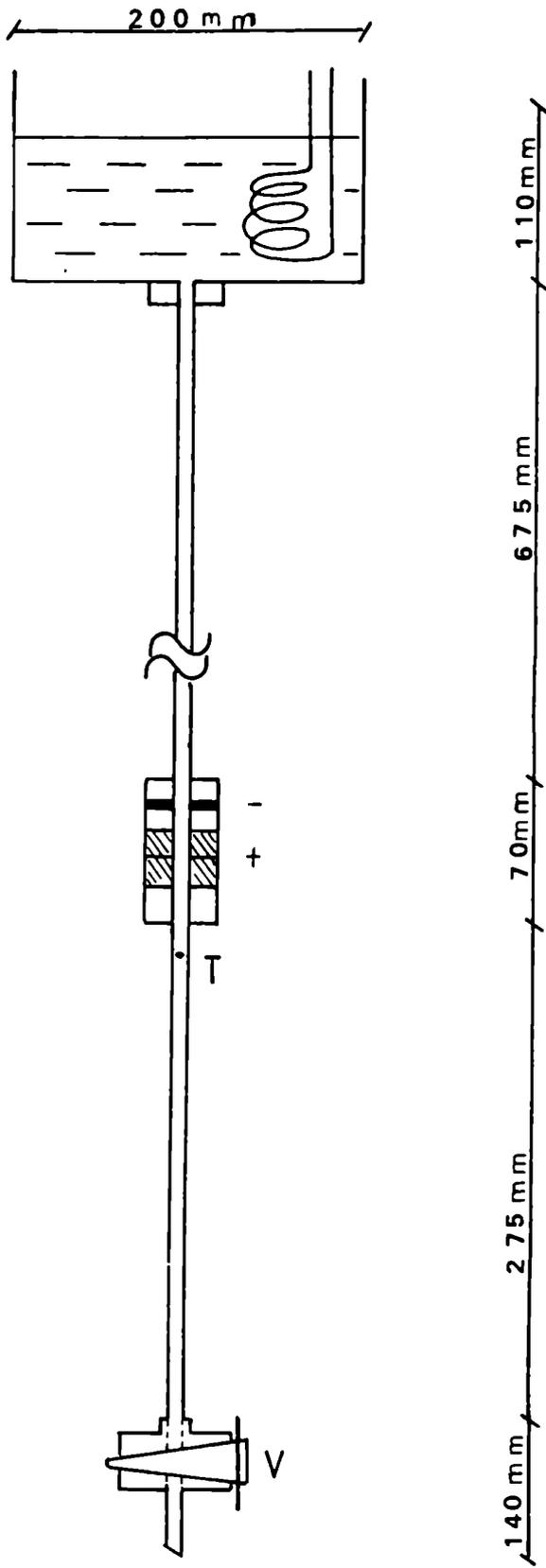


fig. I-2

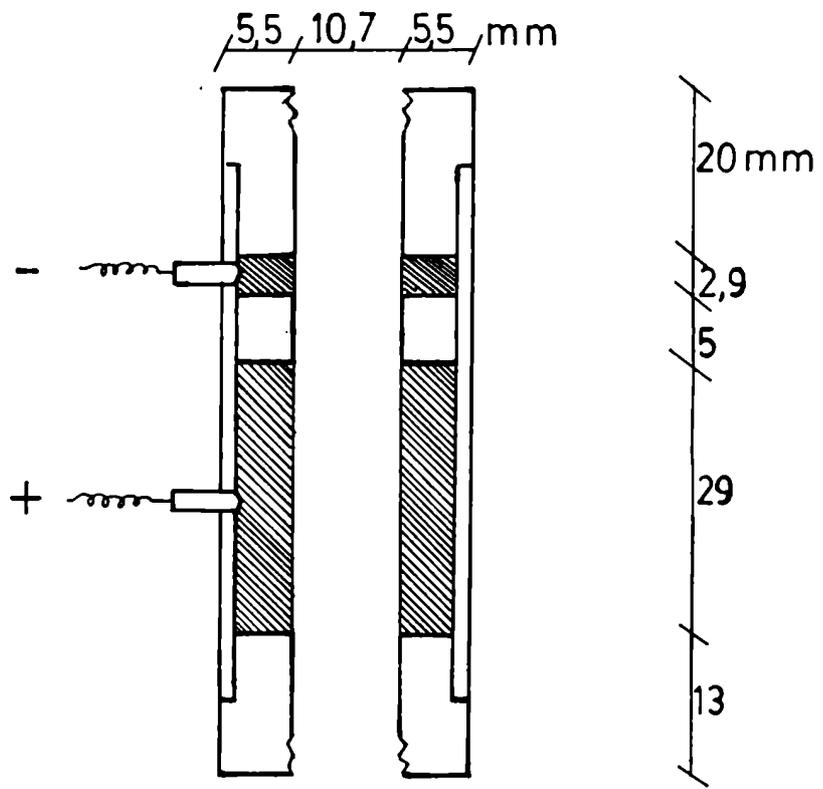


fig. I-3

Para poder medir la temperatura con la precisión necesaria se colocó una termocupla de cobre-constantan envainada en níquel en la pared del tubo en la zona cercana a los electrodos.

3.2.4. Circuito eléctrico

El circuito eléctrico (fig. I-4) consta de las siguientes partes:

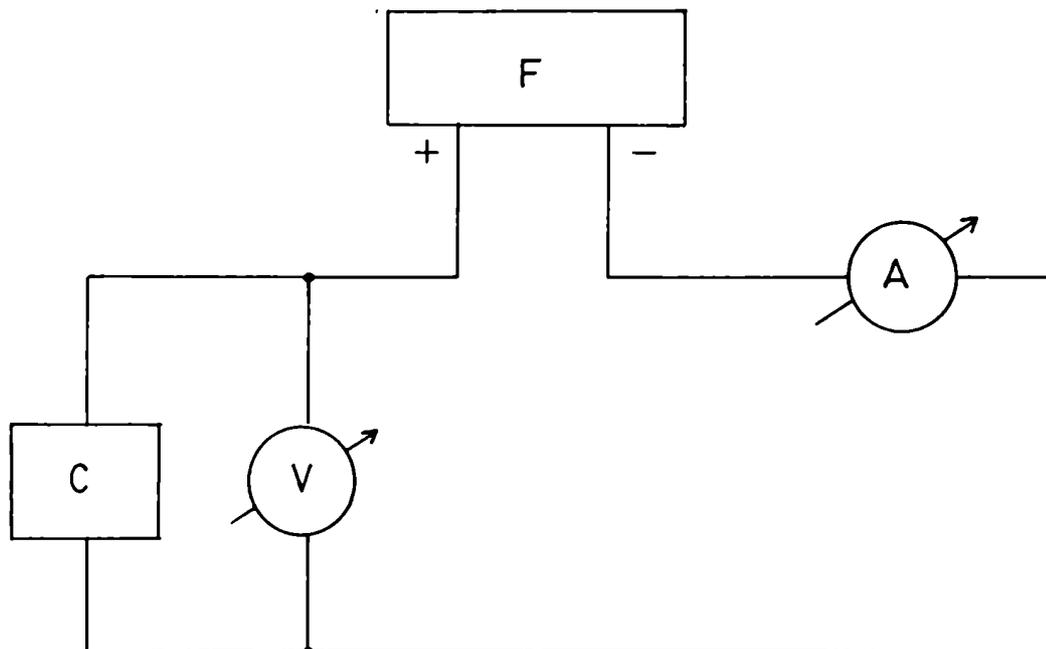
- Fuente de tensión regulada, marca Lambda LH - 122 FM que permite seleccionar la tensión necesaria.
- Voltímetro de alta impedancia, marca Farnell, tipo TM 39, con el cual se mide la tensión aplicada a la celda.
- Microamperímetro marca Kipp and Zonen Microva A L 4 con escalas de $2 \mu\text{A}$ a 50 mA para medir la intensidad de corriente en la rama catódica.

3.2.5. Experiencias realizadas

Se realizaron las curvas de polarización con el fluido en movimiento a distintas velocidades y temperaturas. La fig. I-5 muestra, como ejemplo, los resultados obtenidos para una temperatura y un caudal dados. A partir de dichas curvas surgió 0.6 volt como potencial de trabajo.

Con el fin de calcular los coeficientes de difusión a partir de la ecuación (I-7), se determinaron los caudales (Q), midiendo volúmenes de fluido y tiempos de descarga. De las intensidades límite I_1 , correspondientes a cada caudal y para distintas temperaturas ensayadas se construyeron

///



F FUENTE
C CELDA DE FLUJO
V MILIVOLTMETRO
A MICROAMPERIMETRO

fig. I-4

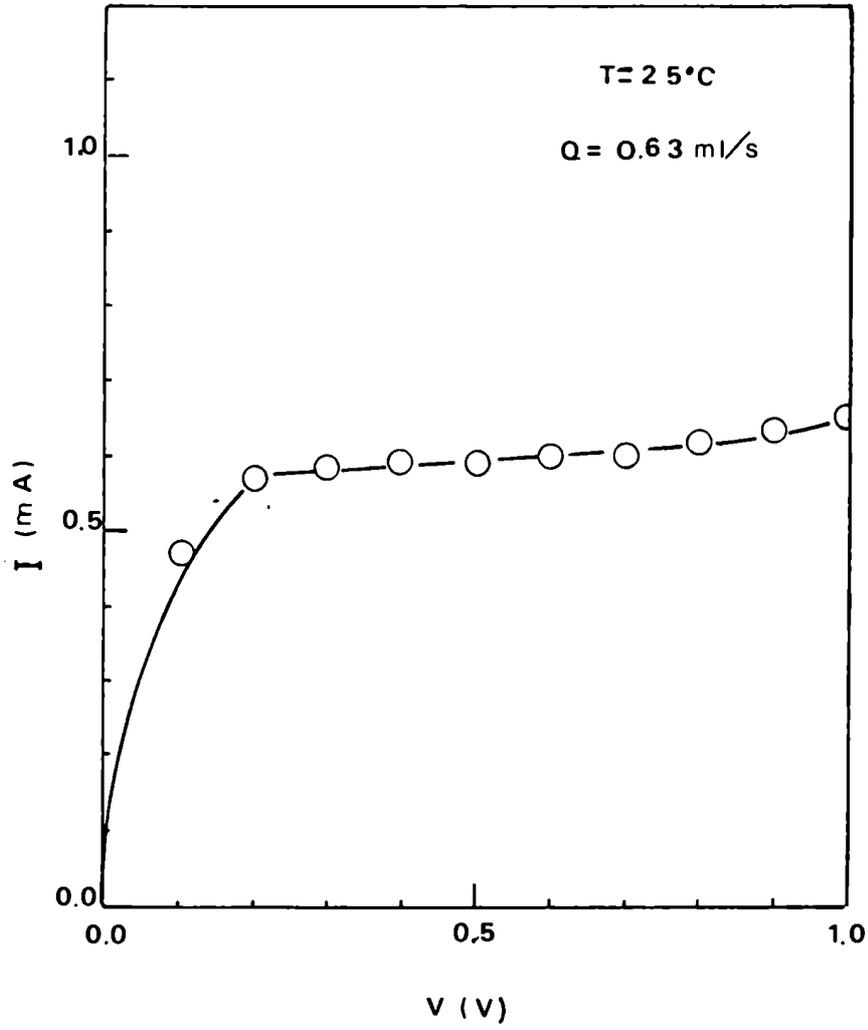


fig. I-5

gráficos I_1 vs $Q^{1/3}$ (fig. I-6).

Los resultados obtenidos de los gráficos correspondientes a cada temperatura indican que la intensidad no guarda una relación lineal con $Q^{1/3}$, como sería de esperar de acuerdo a la ecuación (I-7). Este comportamiento anómalo de las soluciones hace que aquella no pueda aplicarse con el fin de calcular los coeficientes de difusión.

3.3. Conclusiones

Ante esta dificultad se tuvo que descartar el empleo del PAA AP-30 en esta investigación, ya que el conocimiento del coeficiente de difusión en soluciones de ese polímero es indispensable para poder evaluar los resultados de transferencia de materia que se obtendrían.

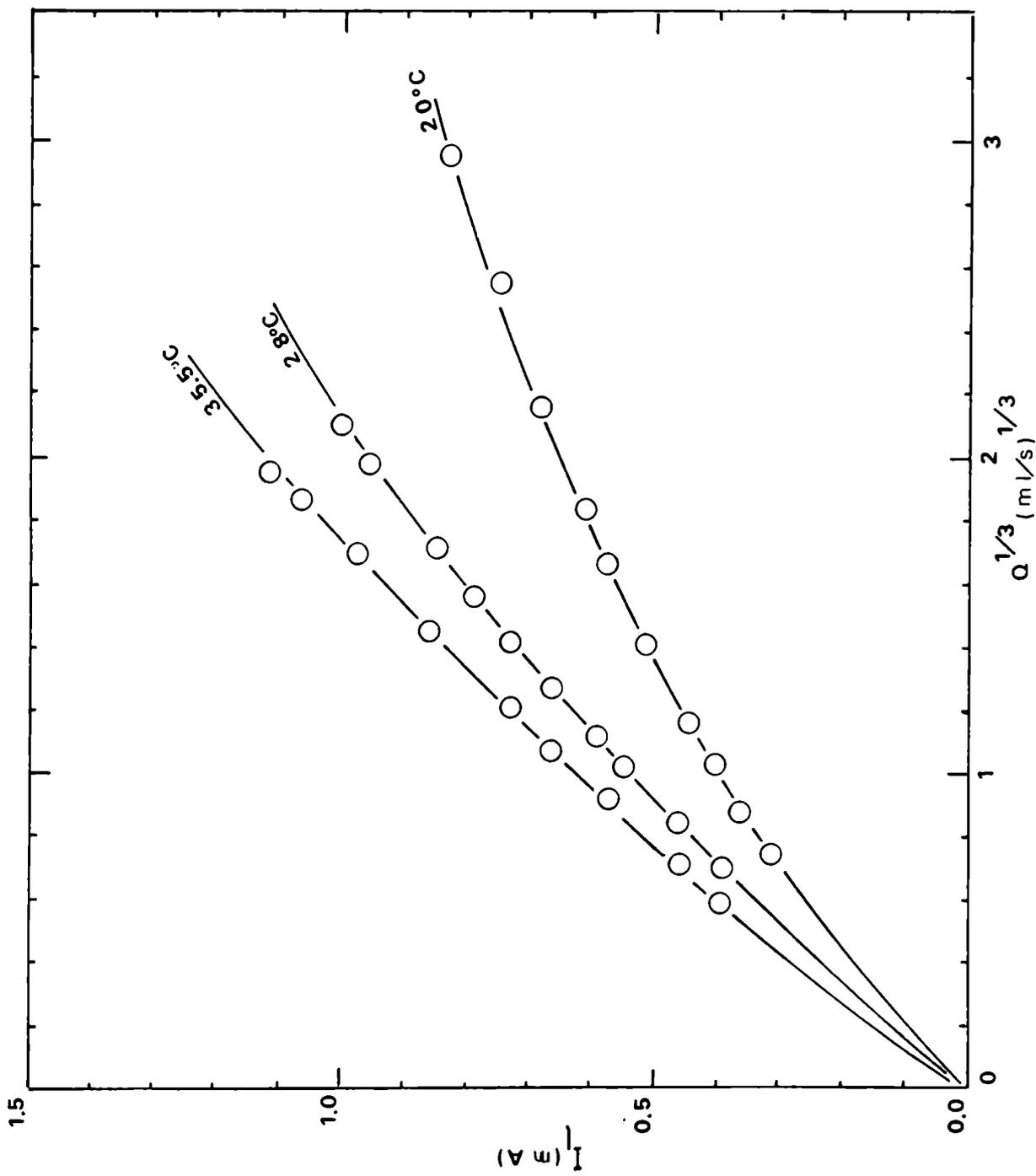


fig. I-6(a)

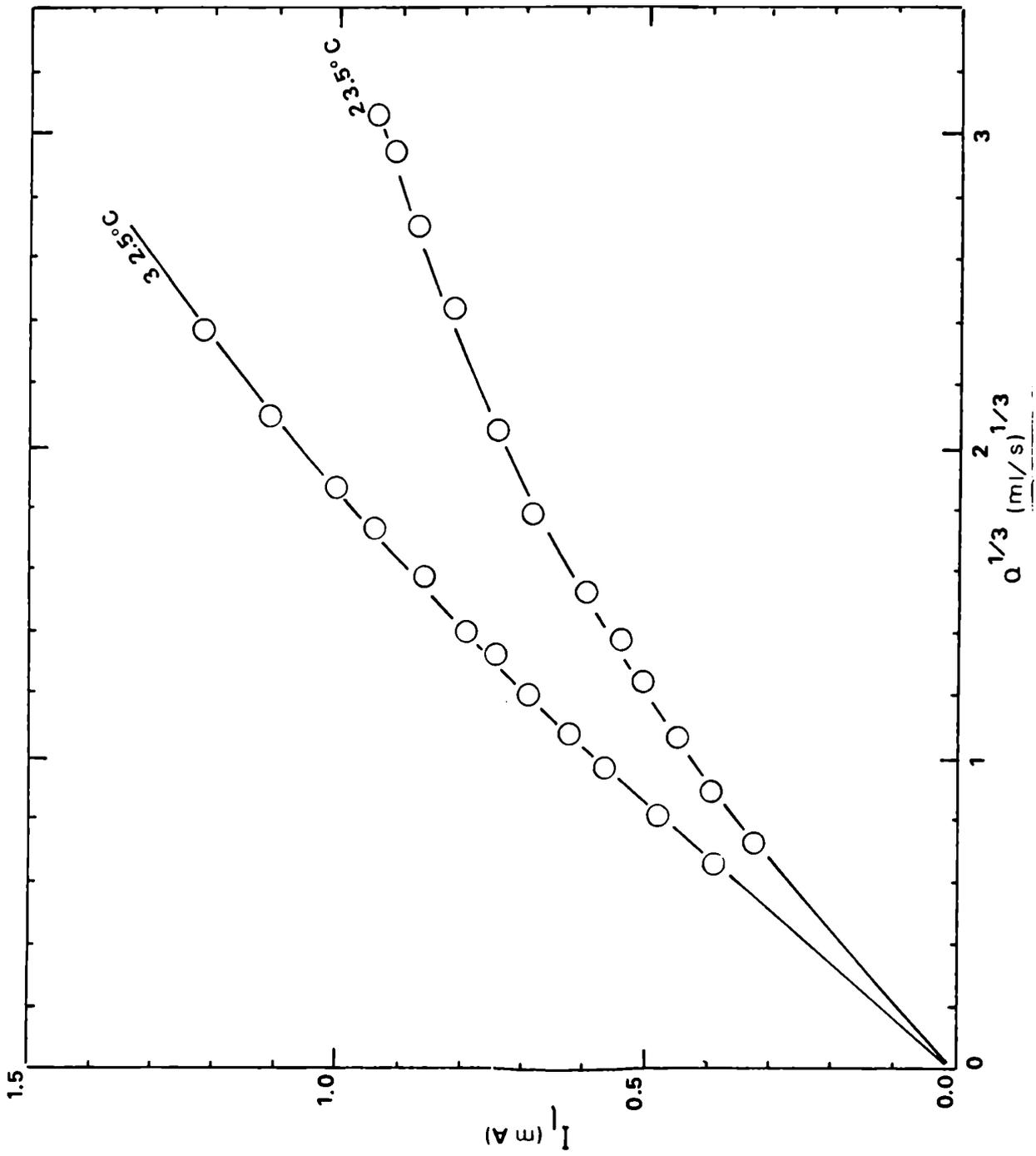


fig. I-6(b)

4. Caracterización de las soluciones que contienen CMC

El hecho de descartar a la poliacrilamida como polímero a ser usado como espesante en este trabajo hizo que la elección se volcara hacia la CMC que era el otro polímero que se disponía.

Anteriormente, Tonini (1981) determinó las propiedades físicas de varias soluciones, las cuales se resumen en las tablas II y III.

También se ensayaron soluciones con concentraciones de ferri-ferrocianuro de potasio menores que las empleadas por Tonini. En base a estos ensayos se estableció que el estudio de transferencia de materia en lechos de varias mallas se podía realizar empleando soluciones 10^{-3} M en ferri-ferrocianuro de potasio, con las cuales se aseguran las condiciones de corriente límite.

La composición de estas soluciones se muestra en la Tabla IV.

De estas soluciones no se tenía información sobre sus propiedades físicas, y eso sumado al hecho que en las experiencias de transferencia de materia en lechos de varias mallas se empleó CMC de una nueva partida, condujo a la necesidad de realizar mediciones de propiedades físicas con el fin de caracterizarlas.

4.1. Comportamiento reológico

Mediante el uso de un viscosímetro rotacional de cono y plato, marca Ferranti, se caracterizó el comportamiento reológico de estas soluciones, determinándose que las lla-

///

madras BCL, RCL03, RCL075 y RCL12 presentaban comportamiento Newtoniano, mientras que aquellas identificadas como L1 y L15, respondían a la ley de la potencia (ec. I-1).

En la fig. I-7 se representa $\log \gamma$ vs $\log \dot{\gamma}$ para las soluciones L1 y L15 a distintas temperaturas y de ellas se obtuvieron K y n para estas soluciones en cada caso; las mismas se muestran en la Tabla V.

Con estos datos se hizo una representación tipo Arrhenius para cada solución que se muestra en la fig. I-8 y a partir de la cual se determinó el K de cada solución a 25°C.

Las soluciones con comportamiento Newtoniano fueron caracterizadas por su viscosidad dinámica μ .

Las densidades de las soluciones se midieron con balanza de Mohr.

Todas las propiedades figuran en la Tabla VI.

4.2. Difusividad

Los coeficientes de difusión fueron medidos mediante el método electroquímico ya descrito.

Los resultados experimentales obtenidos con el equipo descrito en 3.2.3., se graficaron en la forma I_1 vs $Q^{1/3}$ (figs. I-9).

A partir de esos gráficos se determinaron los coeficientes de difusión para cada solución a distintas temperaturas con los que se construyeron gráficos del tipo Arrhenius, $\ln D$ vs $\frac{1}{T}$, que se pueden ver en la fig. I-10, con los cuales se dispone de datos de difusividad a cualquier temperatura dentro del rango barrido.

En la Tabla VI se asentaron los datos de difusividad

///

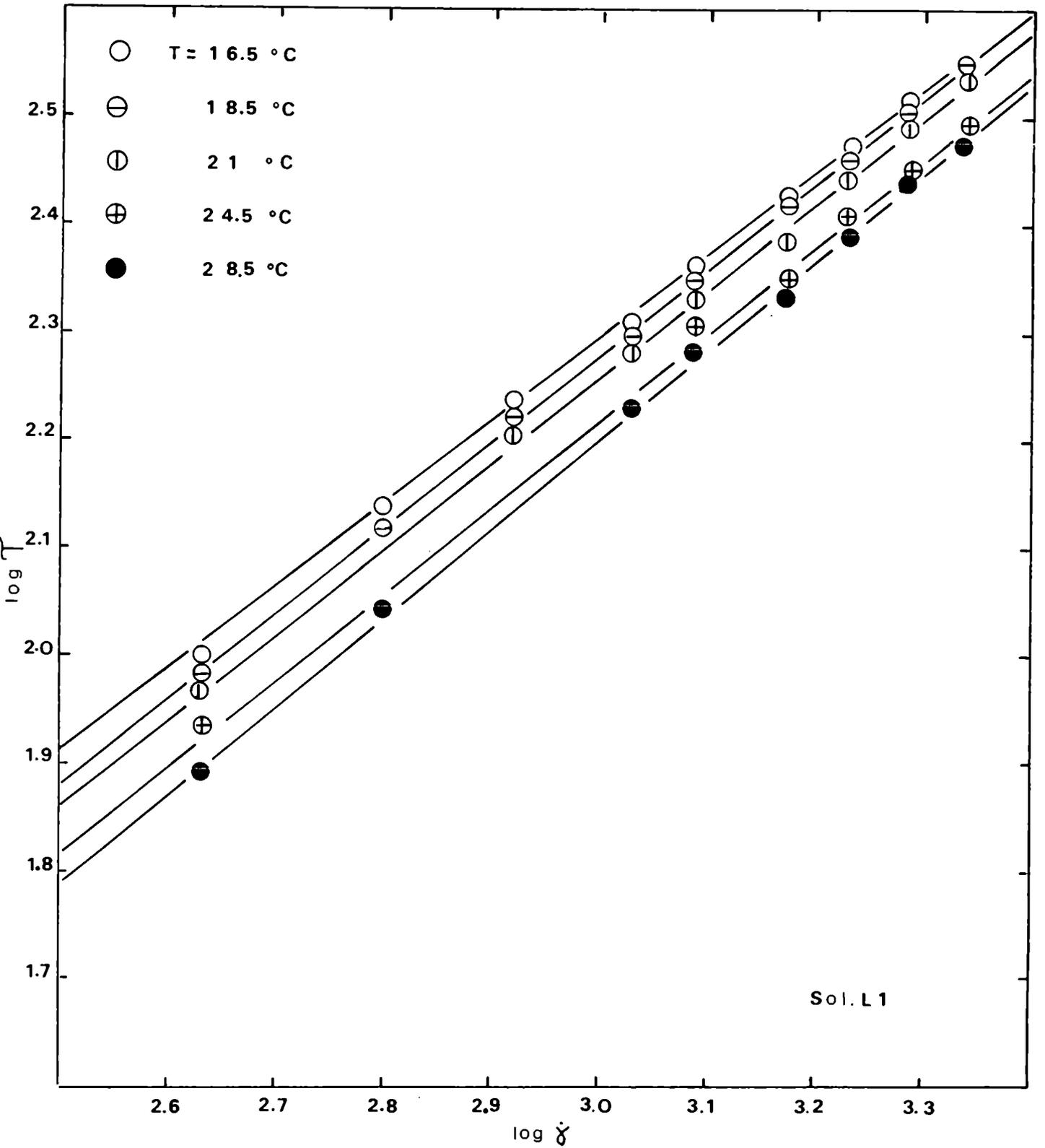


fig. I-7(a)

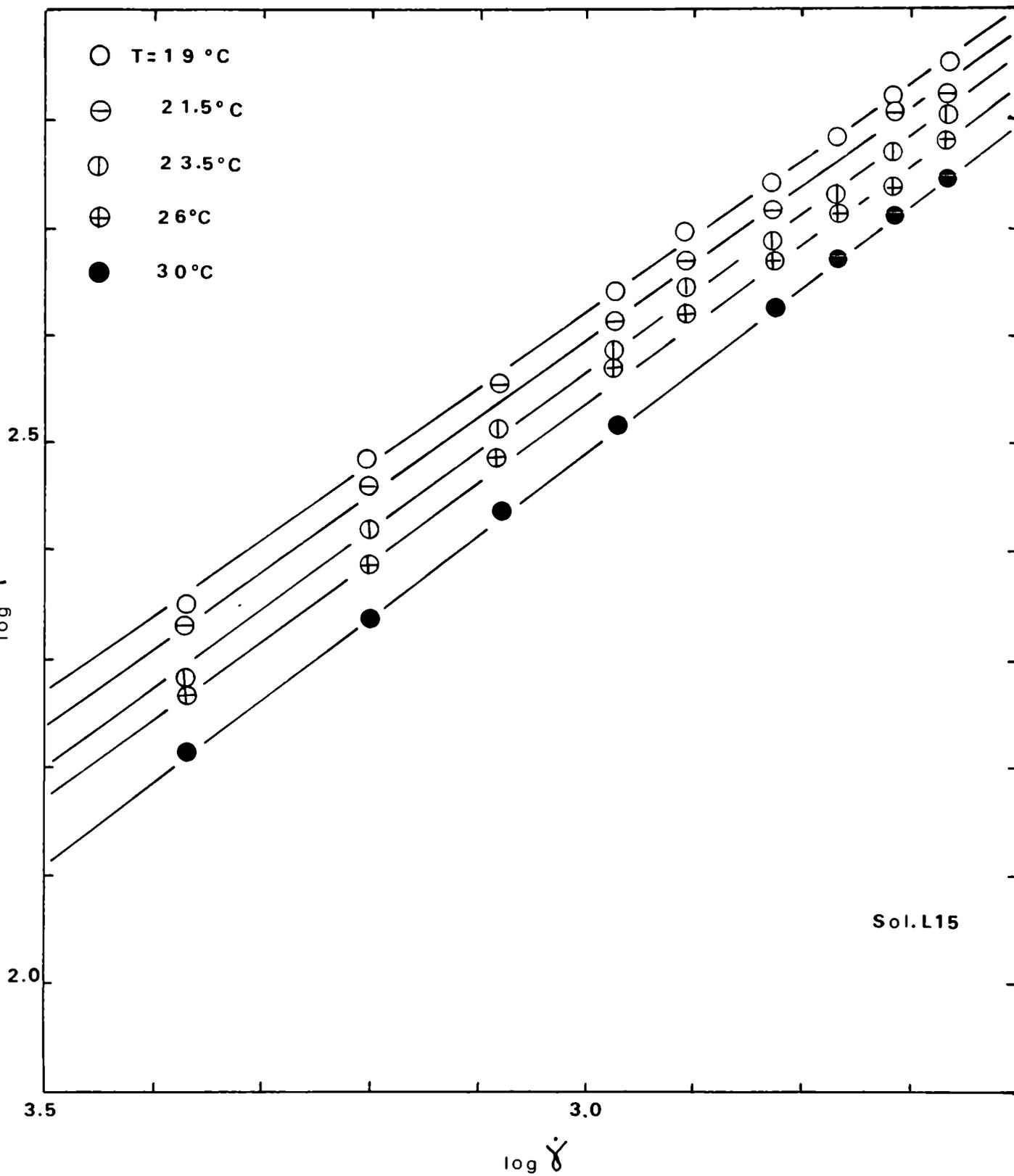


fig. I-7(b)

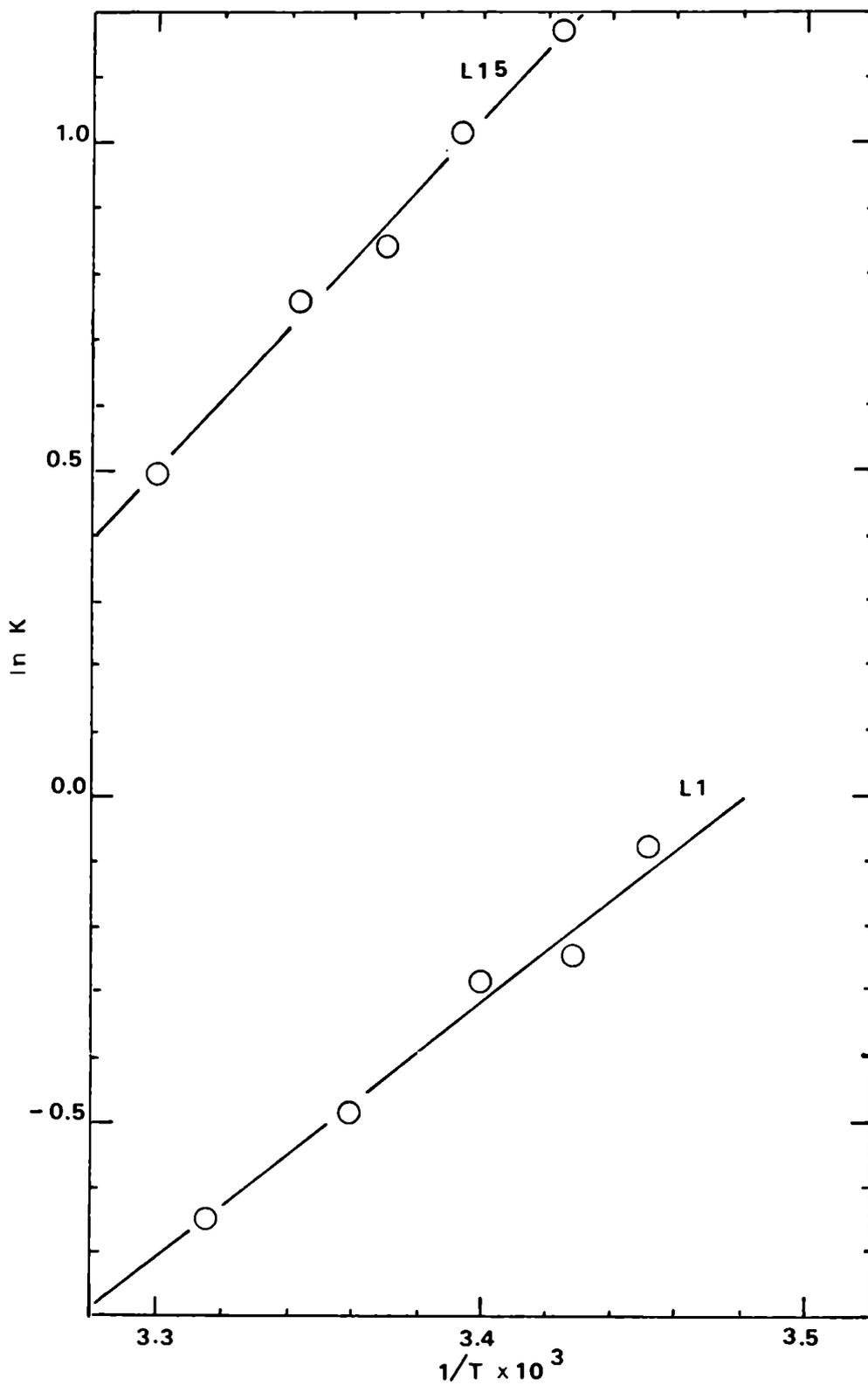


fig. I-8

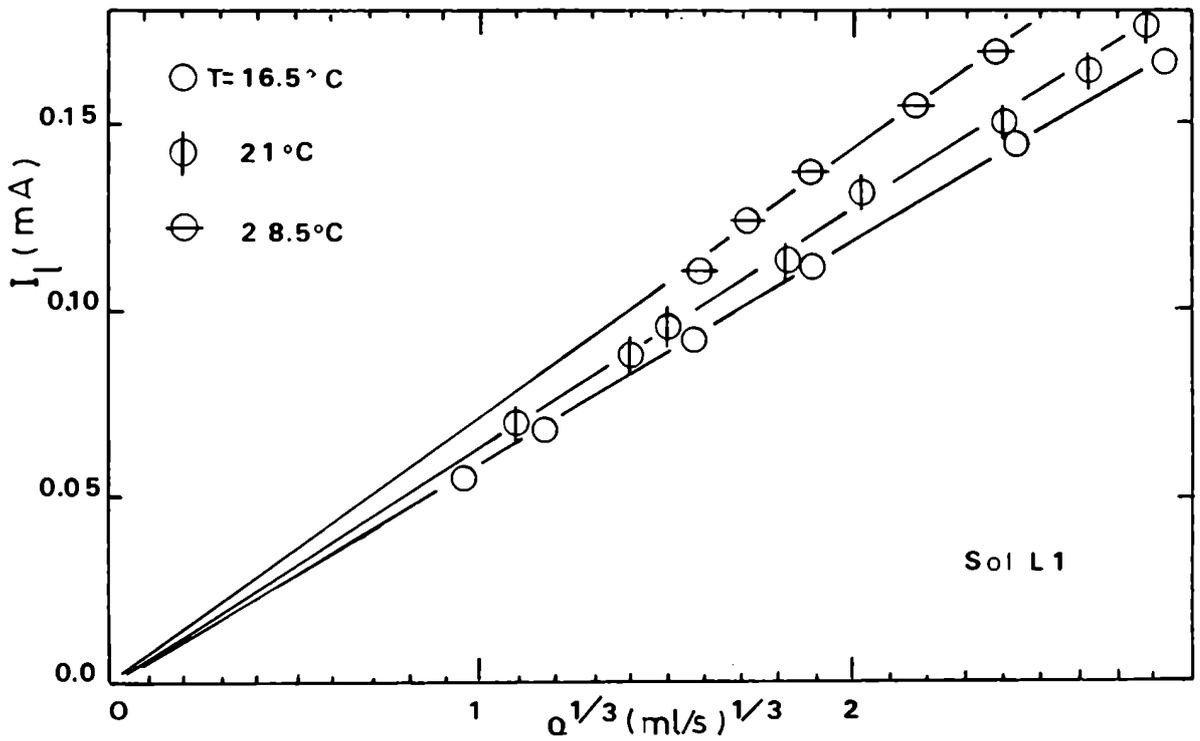
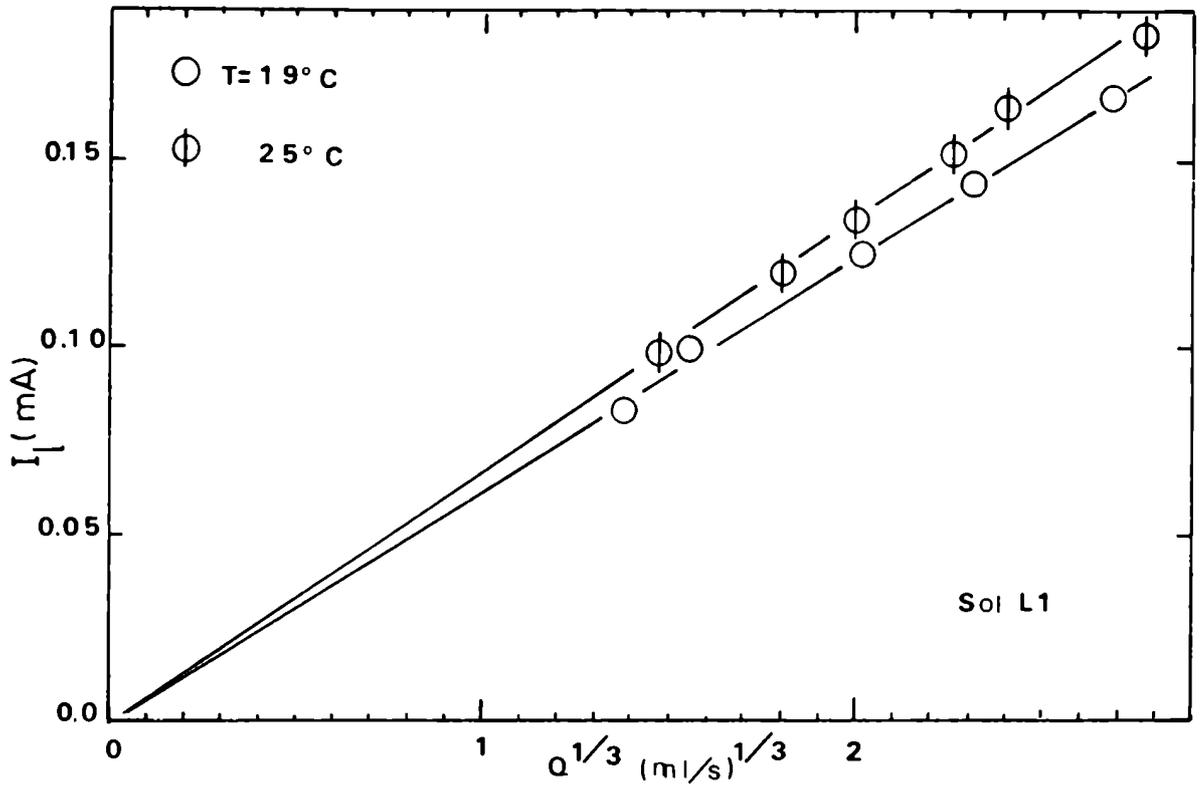


fig. I-9(a)

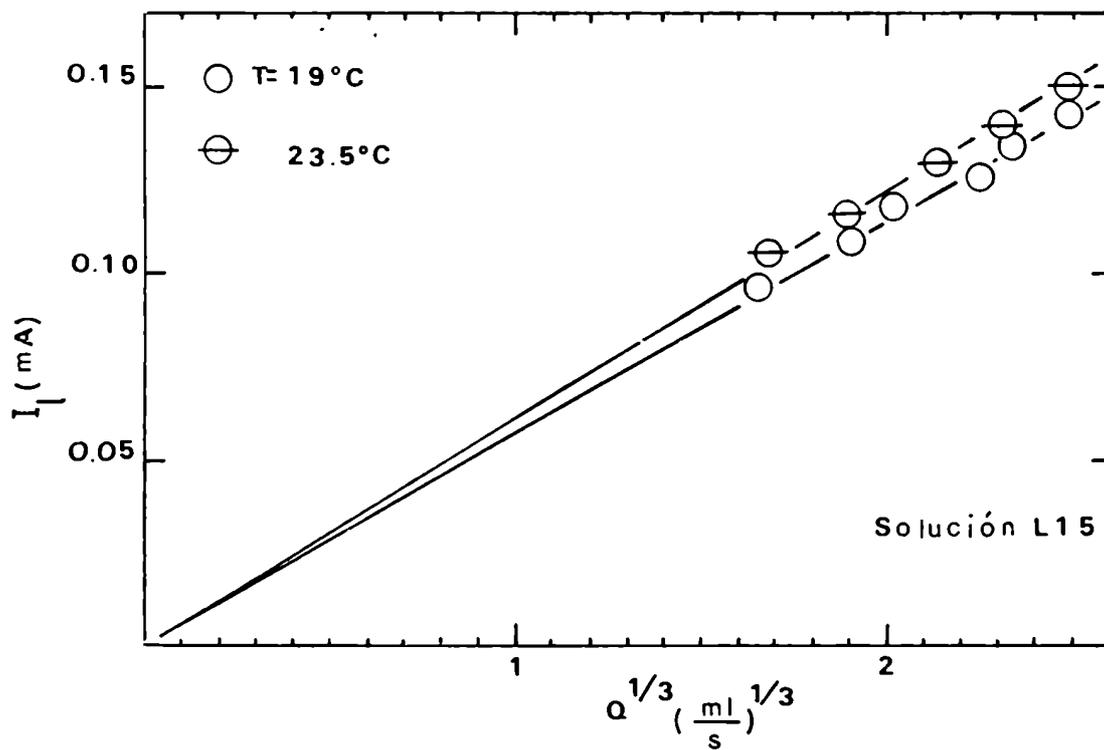
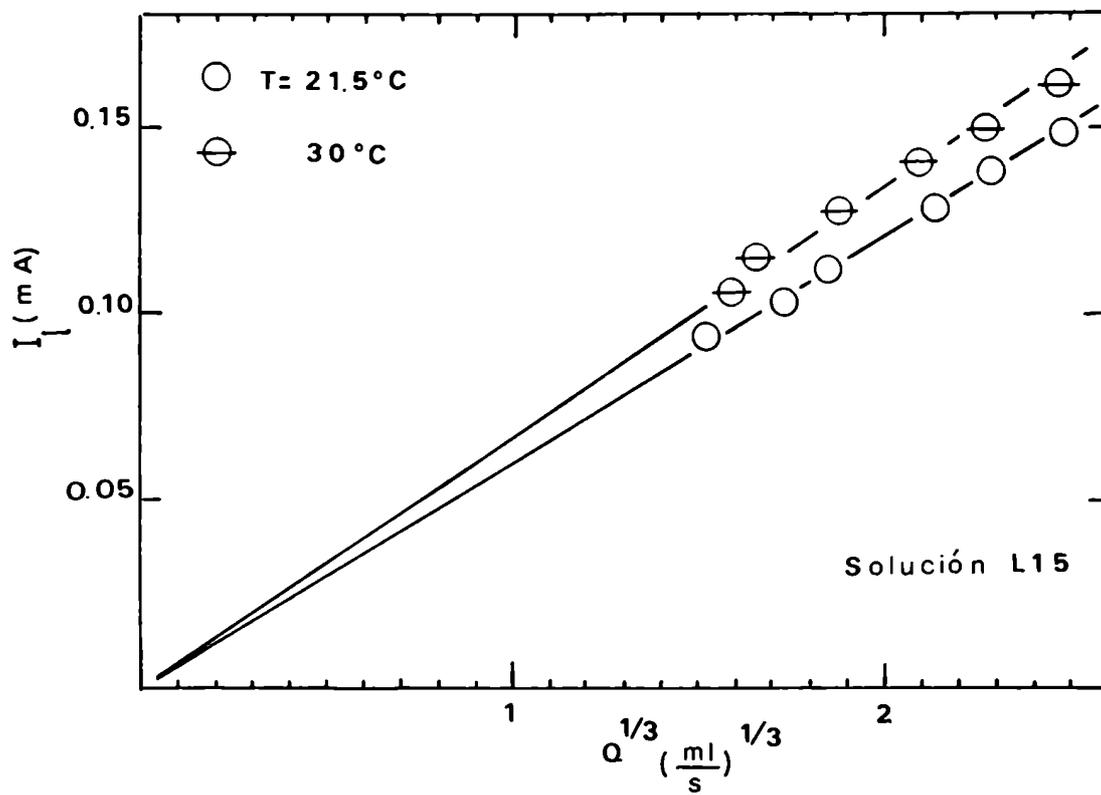


fig. I-9(b)

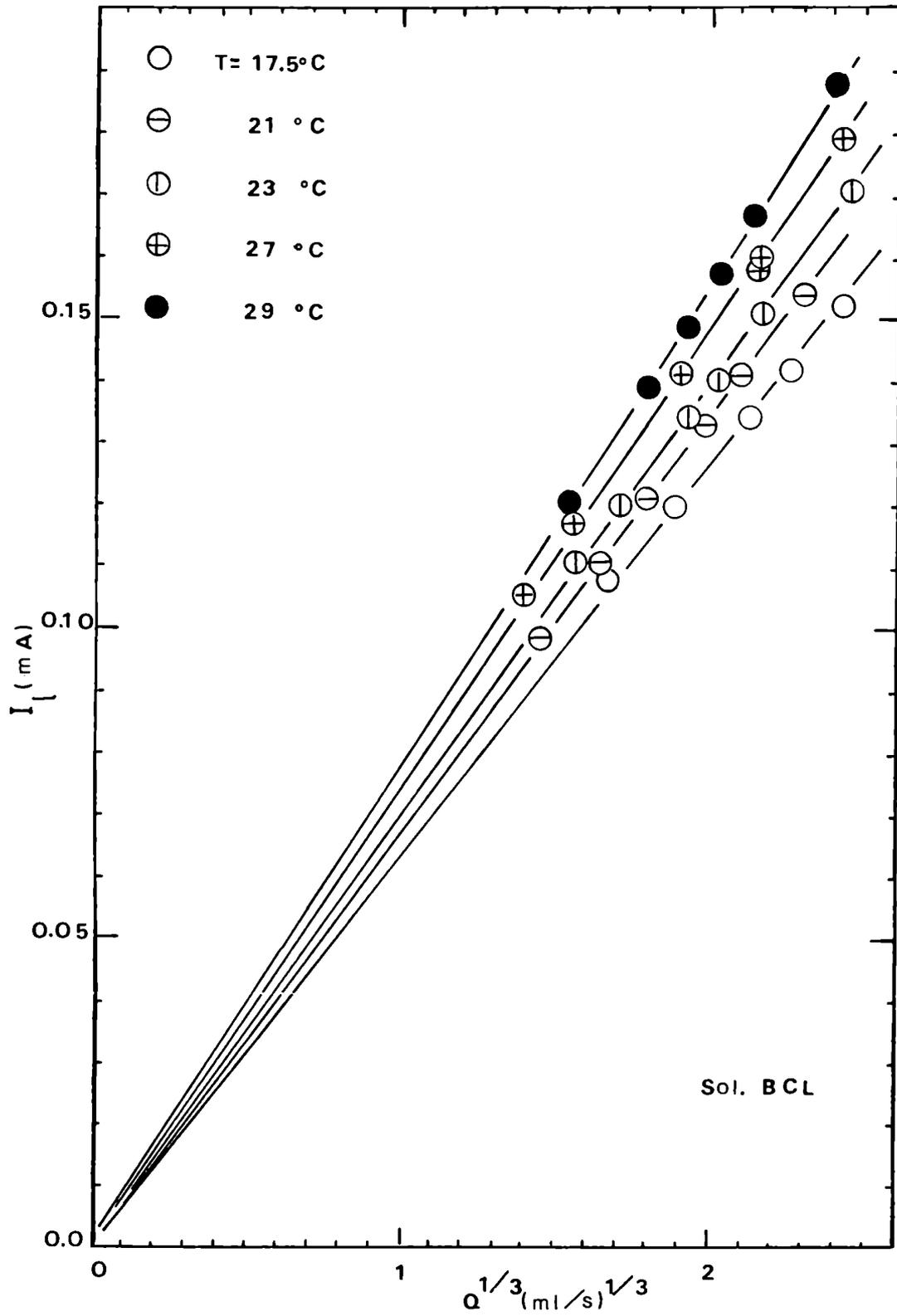


fig. I-9(c)

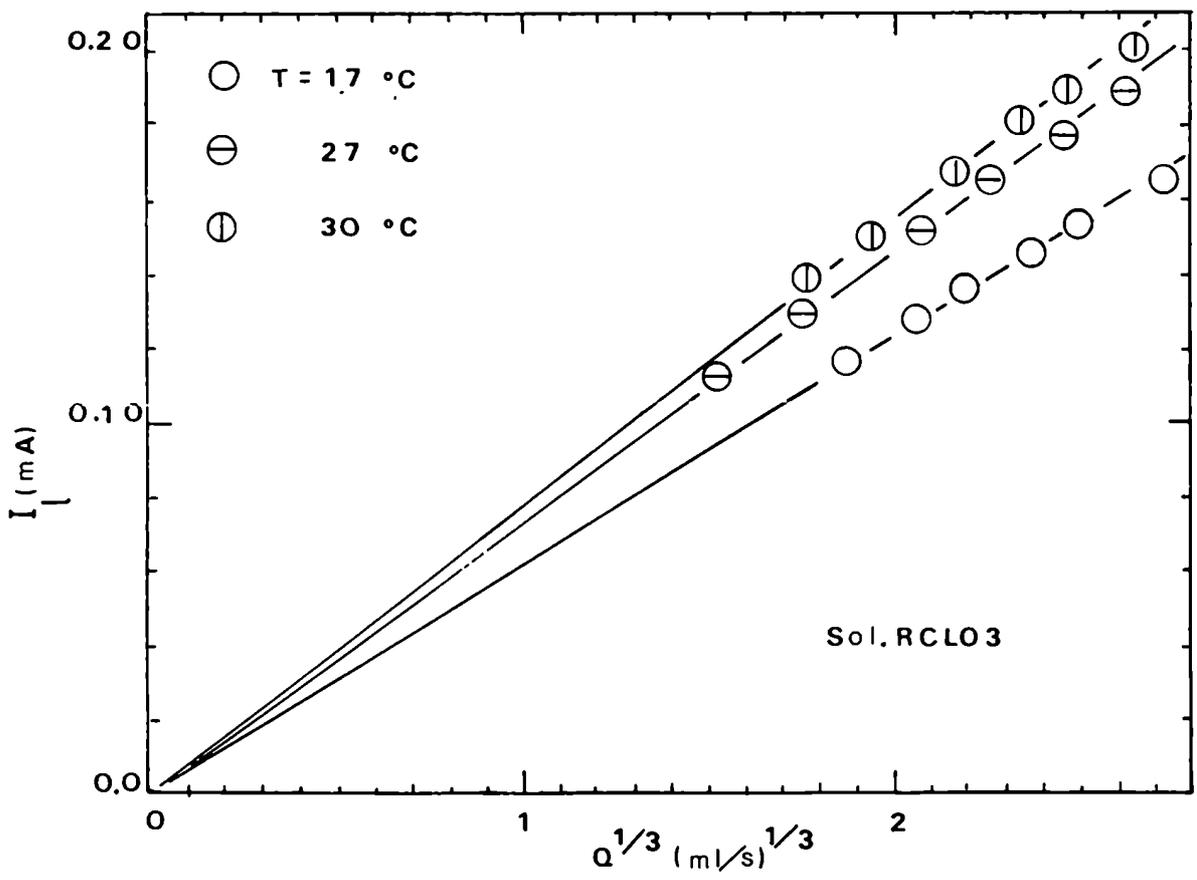
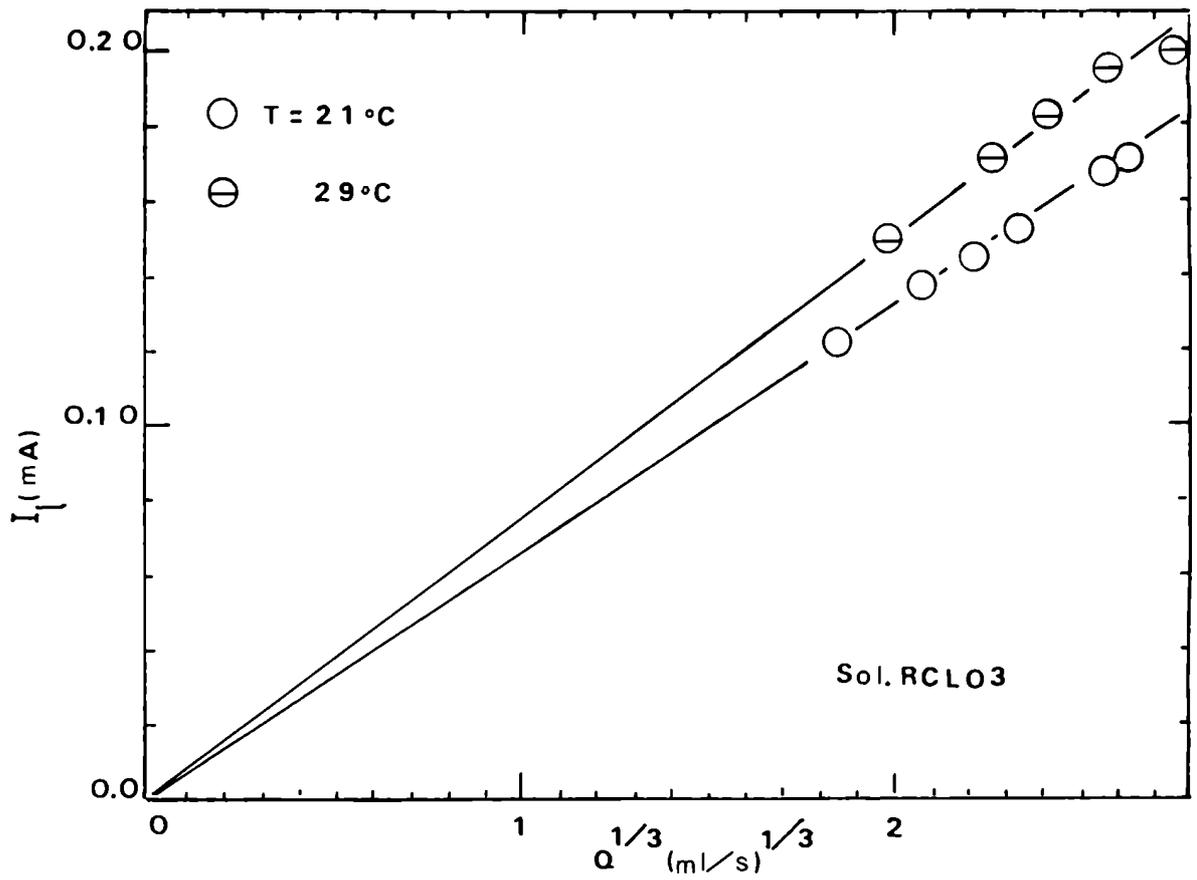


fig. I-9(d)

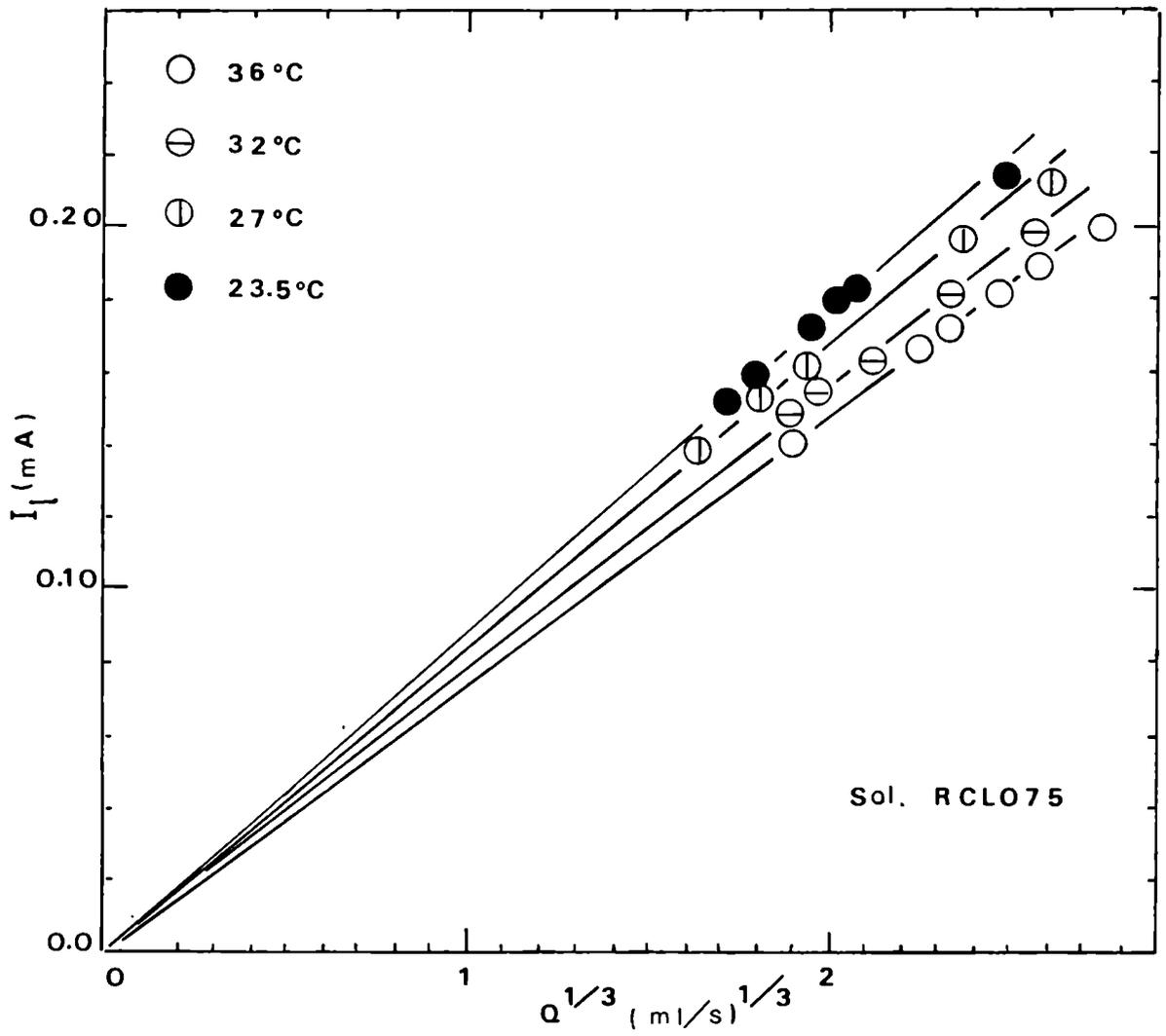


fig. I-9(e)

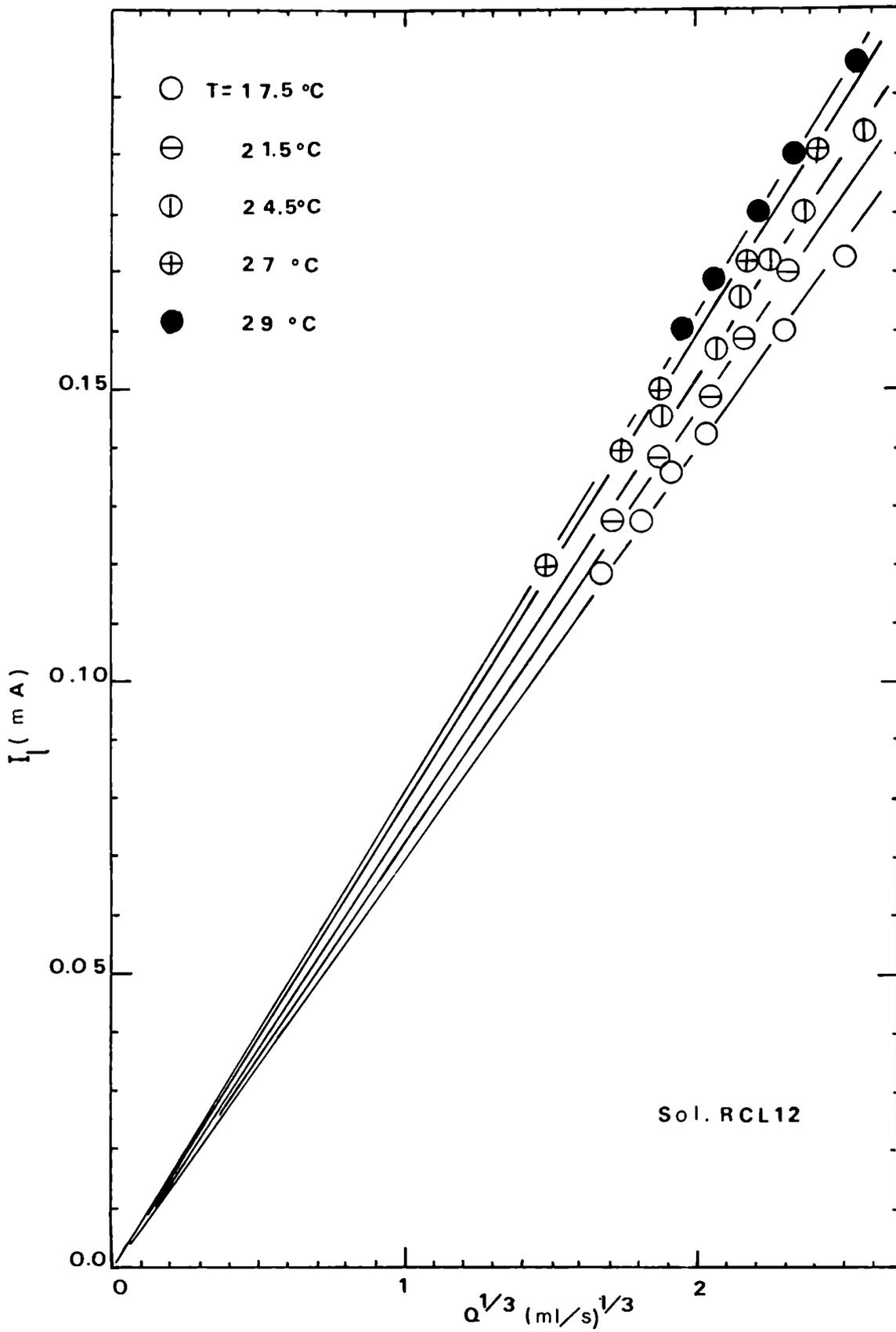


fig. I-9(f)

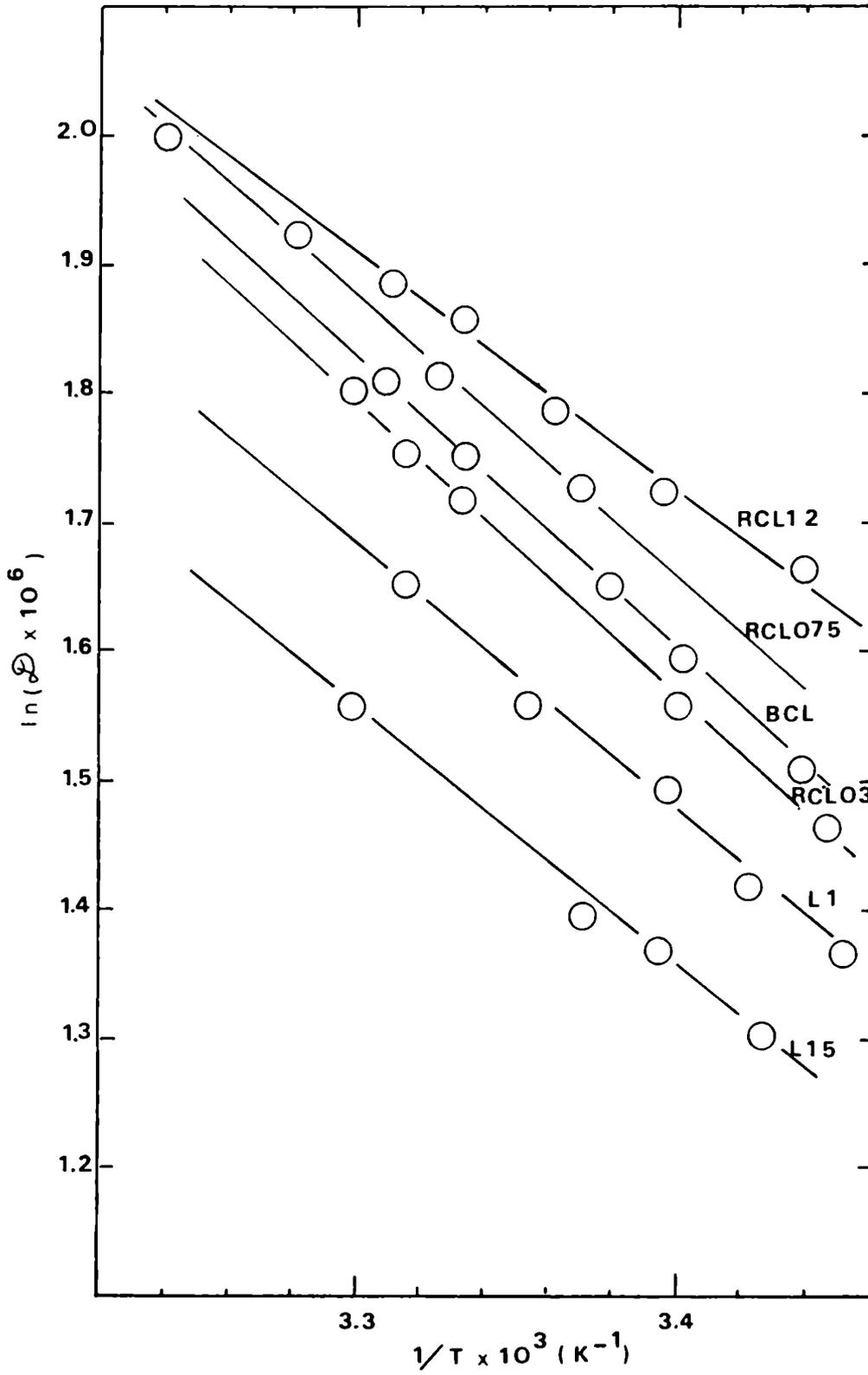


fig. I-10

a 25°C para todas las soluciones empleadas.

4.3. Conclusiones

De la observación de los valores de difusividad que aparecen en las Tablas III y VI surge que la misma tiende a crecer al aumentar la concentración de CMC ROSENCO. Esto, en principio resulta sorprendente ya que se espera que para soluciones más viscosas, la difusividad sea menor, como lo indican varias expresiones para sistemas con polímeros, que existen en la literatura.

En consecuencia se presentó la necesidad de hacer un análisis más profundo de la bibliografía, con el fin de llegar a una mejor comprensión de los resultados experimentales obtenidos.

///

5. Recopilación bibliográfica

Mediante el análisis de la bibliografía se reunió un gran número de publicaciones que demuestran cuánto se ha investigado sobre la difusividad de una especie en soluciones de polímeros. A continuación se citarán varios de esos trabajos que pueden ilustrar el panorama sobre el tema.

Clough y col. (1962) hicieron circular soluciones de polímeros en flujo laminar a través de tubos construidos de un soluto que difunde; concretamente midieron la velocidad de disolución de β -naftol en una solución acuosa de CMC y de ácido benzoico en suspensiones de arcillas. Propusieron un modelo estructural simple del cual se deriva una expresión para predecir difusividades en soluciones de polímeros.

Debido a las suposiciones que se hacen, la expresión predice una difusividad siempre menor que en agua pura.

Astarita (1965) determinó la difusividad de CO_2 y etano en suspensiones de arcilla y soluciones acuosas de polímeros por medio de la absorción gaseosa en "jets laminares". De los resultados surge, que los valores medidos de difusividad son del mismo orden de magnitud que en el agua, y aumentan al crecer la concentración de polímero, o la concentración de sólidos en el caso de las suspensiones.

Otro autor que se ha ocupado del tema tratando de hallar explicación a estos fenómenos es Metzner (1965). Analiza las experiencias donde se encontraron valores de difusividad anormalmente altos en la transferencia de solutos de bajo peso molecular en ciertas soluciones de polímeros y suspensiones coloidales. Para ello toma resultados experimentales de

///

tres fuentes diferentes, la más importante de las cuales es el trabajo de Astarita (1965) y trata de explicar a nivel molecular por qué la velocidad de difusión en un líquido puede ser aumentada apreciablemente usando macromoléculas o partículas coloidales.

En un trabajo posterior, el mismo Astarita (1966) midió la velocidad de disolución de placas de ácido benzoico en una película de solución acuosa de CMC al 2% que escurría sobre las placas. El valor de la difusividad obtenido resultó ser mayor que aquel para el agua.

La técnica empleada por Quinn y Blair (1967) involucra una medición de la velocidad de absorción en estado transiente de un gas soluble, en un líquido estanco. Estos autores midieron coeficientes de difusión de CO_2 y SO_2 en soluciones acuosas de CMC. Dichos coeficientes fueron en todos los casos menores o a lo sumo iguales a los valores correspondientes al agua pura.

Paul (1967) usó un interferómetro para determinar perfiles de concentración experimentales en sistemas de polímero y solvente. Los perfiles luego se analizaron para calcular el coeficiente de difusión binaria. Empleó un copolímero de vinilacetato-acrilonitrilo y los solventes: dimetilacetamida (DM Ac), dimetilformamida (DMF) y sulfóxido de dimetilo (DMSO), todos en concentraciones entre 0 y 0,25%, obteniendo que para el DMSO, la difusividad prácticamente no varía con la concentración de polímero y para los otros tiende a crecer ligeramente al aumentar la concentración de aquél.

Hansford y Litt (1968) midieron velocidades de transferencia de materia desde un disco rotatorio construido de un soluto orgánico que difunde a soluciones acuosas de polí-

mero. Los solutos elegidos fueron β -naftol y ácido benzoico, y estudiaron la solubilidad de los mismos en soluciones acuosas al 1% en CMC y 1,4% en Polyox (óxido de polietileno) respectivamente, obteniendo como resultado valores de difusividad que disminuyen al aumentar la viscosidad del fluido.

El disco rotatorio fue utilizado como electrodo por Arvía y col. (1968) quienes por medio de la técnica electroquímica determinaron coeficientes de difusión de varios iones, entre ellos el ferricianuro, en soluciones que contenían CMC en concentraciones variables. También en este trabajo se puede observar una caída de la difusividad con el aumento de la viscosidad.

Dim y col. (1971) usaron el "jet laminar" e informan algunos nuevos datos de la difusividad de CO_2 y propano en alquil alcoholes primarios y de CO_2 en soluciones de Methocel (éter de metil celulosa). En este último sistema las difusividades resultan ser crecientes con la concentración del polímero.

El electrodo de disco rotatorio fue empleado por Greif, Cornet y Kappesser (1972) con el fin de determinar la difusividad molecular de oxígeno en soluciones acuosas de Na Cl, a las que se agregó Polyox en distintas concentraciones. Los valores de difusividad en las soluciones de Polyox resultaron siempre menores que para la solución salina y los autores concluyen que los coeficientes de difusión disminuyen al aumentar la concentración del polímero.

Resultados similares encontraron Wasan y col. (1972) quienes usaron una columna de pared mojada para estudiar si el agregado de pequeñas cantidades de polímeros al agua afecta la solubilidad del oxígeno en estas soluciones. Los polímeros ele-

///

gidos por estos autores fueron CMC, Polyox, Carbopol (carboxi-polimetileno), Cyanamer (poliacrilamida) y Methocel. El agregado de cualquiera de ellos, excepto el Polyox, condujo a valores del coeficiente de difusión más bajos que en el agua pura.

Pérez y Sandall (1973) utilizando también una columna de pared mojada midieron los coeficientes de difusión de CO_2 en soluciones acuosas de Carbopol. Los resultados muestran que la difusividad al principio aumenta y luego disminuye en función de la concentración de Carbopol.

Otro ejemplo es el de Mashelkar y Soyly (1973) quienes midieron la velocidad de absorción de CO_2 en una película laminar de una solución de polímero fluyendo alrededor de una esfera y calcularon el coeficiente de difusión a partir de la solución de la ecuación de difusión convectiva. Se usaron seis polímeros distintos y se observó que la difusividad o crece, o disminuye al aumentar la concentración de polímero, presentando a veces un máximo y otras un mínimo. Los resultados muestran que el aumento de la difusividad no persiste en todos los niveles de concentración, y después de una concentración determinada los valores caen nuevamente pero siempre son mayores que en el agua.

Hubbard y col. (1980) estudiaron la difusión del ión ferricianuro en soluciones de Kelzan XC ("xanthan gum") empleando el método electroquímico. Los datos experimentales de coeficientes de difusión se muestran representados en función del gradiente de velocidades y la concentración de polímero para estudiar ambos efectos. Para todo el rango de gradientes de velocidades estudiado puede verse que el coeficiente de di-

fusión pasa por un mínimo, aproximadamente a una concentración de 1000 ppm y luego aumenta con la concentración de polímero hasta 2900 ppm a la cual ocurre un decrecimiento.

Lal y col. (1980) midieron los coeficientes de difusión de ácido benzoico en soluciones acuosas de CMC mediante la técnica del disco rotatorio a distintas temperaturas. Encontraron que las difusividades en las soluciones al 0,5%, 1%, 2% y 3% de CMC son menores que en agua y disminuyen al aumentar la concentración del polímero. Surge que la relación del coeficiente de difusión en solución de polímero al coeficiente de difusión en agua pura es independiente de la temperatura y es solamente función de la concentración de polímero.

Posteriormente Mashelkar y Soylu (1982) utilizaron un sistema de doble cono mojado para realizar nuevas mediciones y con ellas corroboraron los resultados obtenidos anteriormente con el sistema de esfera mojada.

La información reunida sobre el tema se resume en la página siguiente.

Autores	Polímero	Técnica	Tendencia de ϕ al aumentar la conc. de polímero
Clough y col.(1962)	CMC y arcillas	disolución flujo en tubos	↓
Astarita (1965)	arcillas	abs. gaseosa	↑
Metzner (1965)	no es experi- mental		
Astarita (1966)	CMC	disolución (placas)	↑
Quinn y Blair(1967)	CMC	abs. gaseosa	↓
Paul (1967)	vinilacetato- acrilonitrilo	interferómetro	↑
Hansford y Litt (1968)	CMC y Polyox	disco rotato- rio	↓
Arvia y col.(1968)	CMC	disco rotato- rio	↓
Din y col. (1971)	Methocel	jet laminar	↑
Greif, Cornet y Kappesser (1972)	Polyox	disco rotatorio	↓
Wasan y col. (1972)	varios	columna pared mojada	↓
Pérez y Sandall(1973)	Carbopol	abs. gaseosa	↑↓
Mashelkar y Soyly (1973)	varios	abs. gaseosa	↑↓
Hubbard y col.(1980)	Kelzan XC	electroquímica	↑↓
Lal y col. (1980)	CMC	disco rotatorio	↓
Mashelkar y Soyly (1982)	varios	abs. gaseosa	↑↓

Se ve claramente que la adición de macromoléculas puede producir o un aumento o una disminución de la difusividad. Algunos autores sostienen que la aparente controversia sobre los efectos del agregado de polímero puede estar relacionada con las distintas técnicas experimentales usadas para la determinación del coeficiente de difusión.

El deseo de constatar los resultados experimentales logrados en el presente trabajo, conduce a la decisión de realizar mediciones empleando otro método y de esa forma eliminar dudas sobre la influencia de la técnica experimental.

Con ese fin los coeficientes de difusión de las soluciones BCL, RCL03, RCL075 y RCL12 se determinaron nuevamente empleando el electrodo disco rotatorio.

///

6. Mediciones realizadas con electrodo de disco rotatorio

En los últimos años ha habido un uso creciente del electrodo disco rotatorio en investigaciones, principalmente para determinar coeficientes de difusión. Este electrodo tiene la ventaja de que existe una teoría precisa de la difusión convectiva sobre él.

En 1942, Levich resolvió el problema del transporte de materia a la superficie de un disco rotatorio desde una solución. De acuerdo a Levich la capa de difusión tiene el mismo espesor sobre toda el área de un disco rotatorio y esto hace que los efectos de borde sean despreciables. La ecuación deducida para la densidad de corriente límite cuando la cinética de la reacción está controlada por difusión convectiva en régimen laminar es:

$$j_l = 0,62 Z F c_o \omega^{2/3} \nu^{-1/6} w^{1/2} \quad (I-8)$$

que permite calcular el coeficiente de difusión, conociendo la concentración del ión reactivo y la viscosidad de la solución.

Para realizar las mediciones se usó un equipo TACUSSEL de disco. La celda estaba diseñada de forma tal que permitía saturar las soluciones por burbujeo con nitrógeno con el fin de eliminar la interferencia del oxígeno disuelto.

El electrodo de trabajo era un disco de platino de 4 mm de diámetro.

Se realizaron las curvas corriente vs potencial a diferentes velocidades de rotación entre 500 y 8000 rpm (fig. I-11); obteniéndose la I_l de cada una de ellas. Luego se gra-

///

ficó I_1 vs $W^{1/2}$ para cada una de las soluciones BCL, RCL03, RCL075 y RCL12, fig.(I-12) y a partir de la pendiente de las mismas se calcularon las difusividades.

Los valores de las difusividades obtenidos por este método se muestran en la Tabla VI.

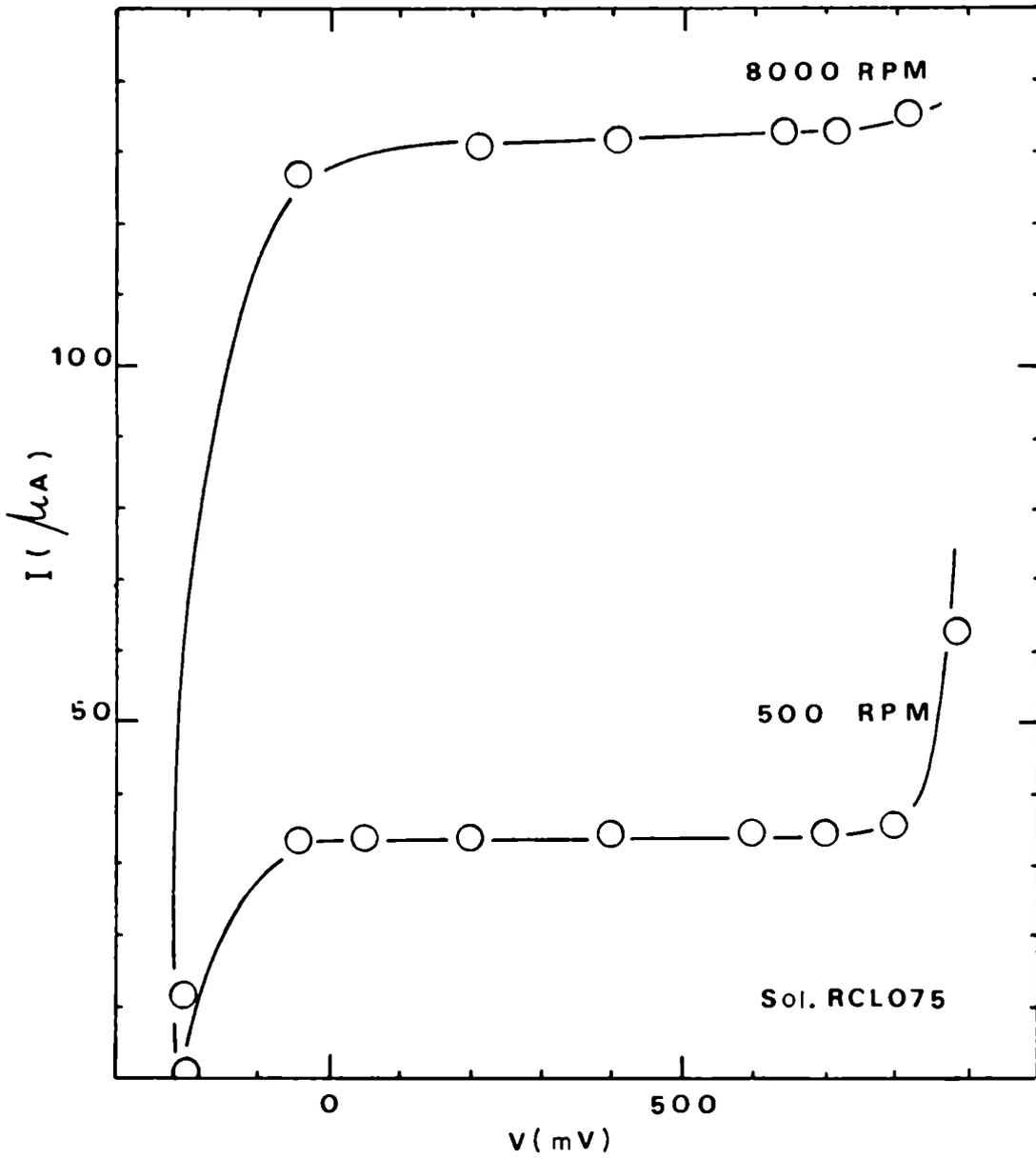


fig. I-11

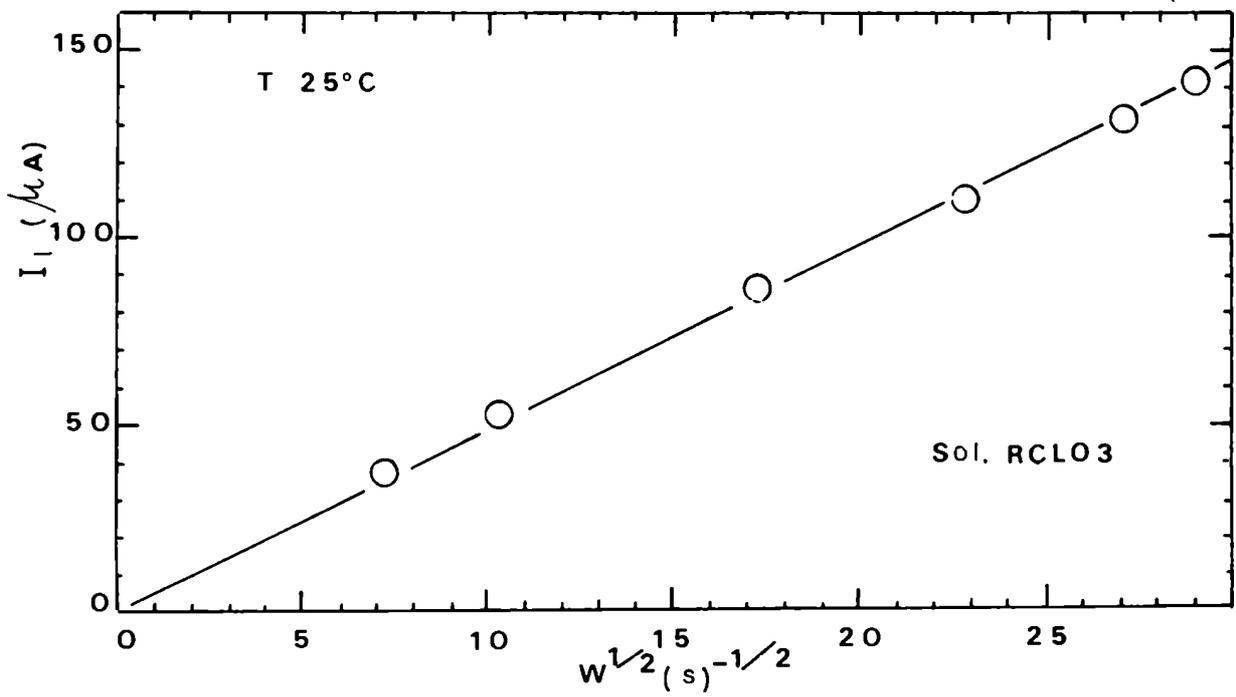
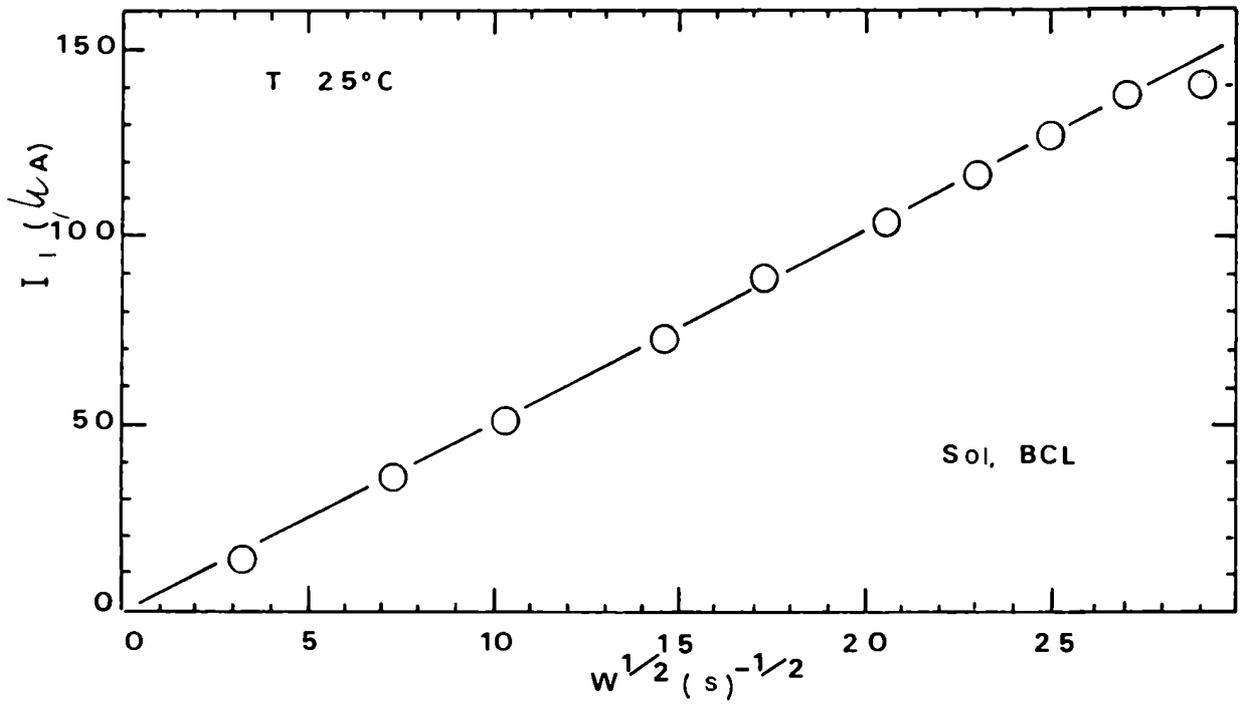


fig. I-12(a)

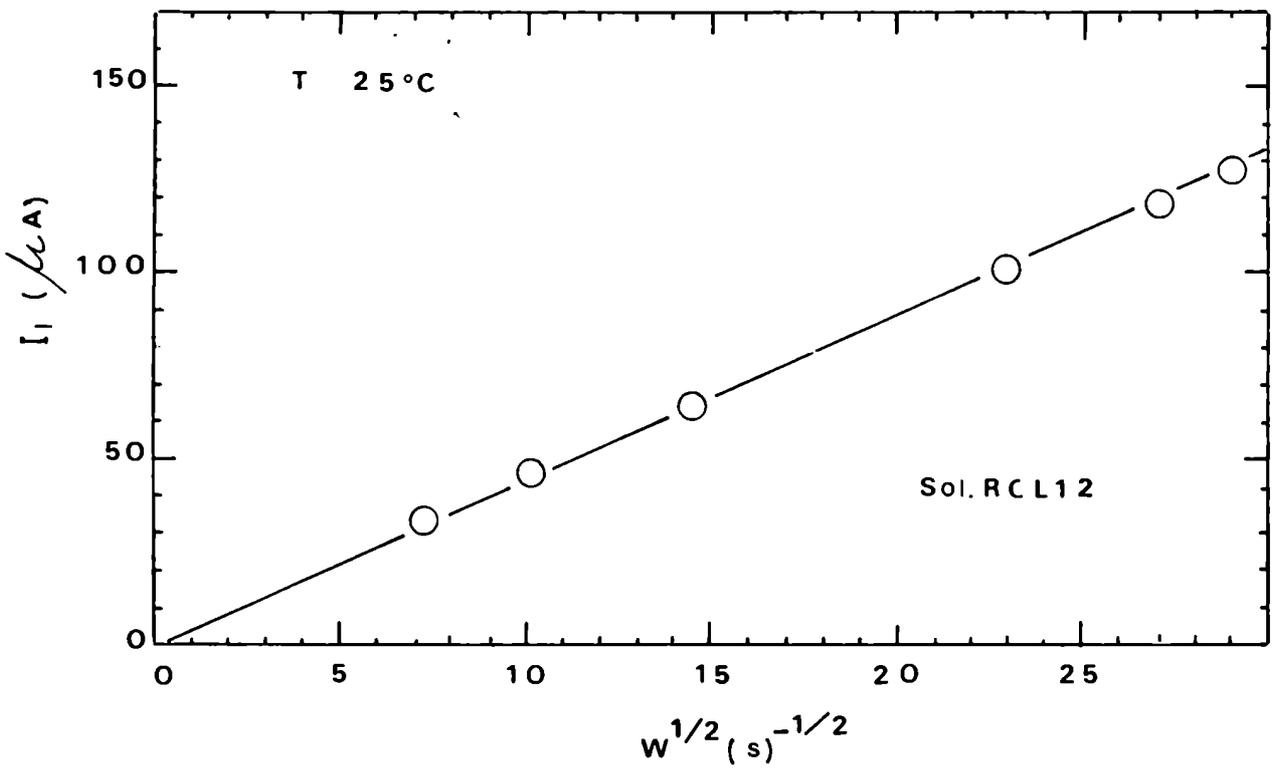
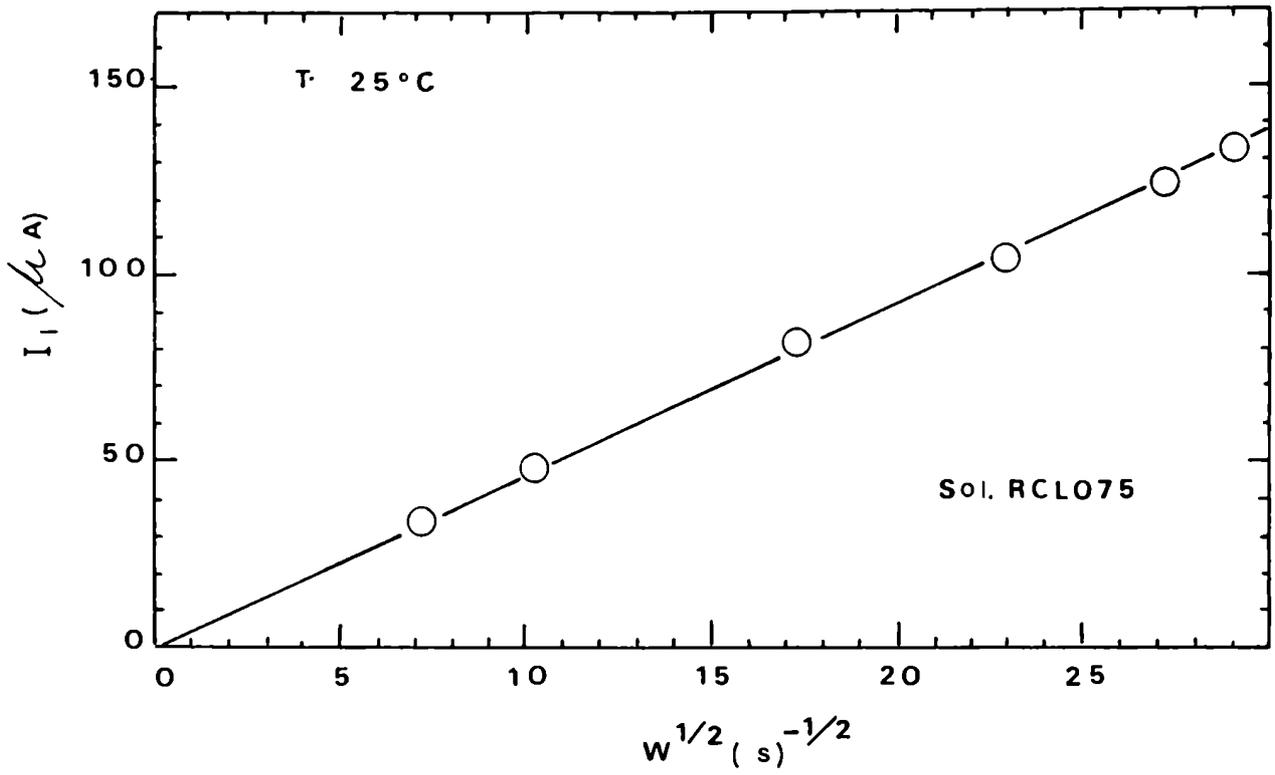


fig. I-12(b)

7. Conclusiones

Al comparar los valores de las difusividades determinados con el electrodo disco rotatorio con aquellos obtenidos en la celda de flujo, se observa que son muy similares y en el caso donde se aprecia una diferencia mayor, ésta es del 4%. Por lo tanto las experiencias realizadas con este sistema no hacen más que corroborar el trabajo realizado anteriormente. Ciertamente es que se ha realizado mucho trabajo en esta área y que se encuentra en la bibliografía mucha información sobre los fenómenos de la difusión en soluciones de polímeros. También es cierto que a veces dicha información resulta contradictoria. Pero es obvio que hace falta mucho más trabajo experimental para resolver esas controversias, antes de que pueda formularse una descripción cuantitativa de dichos fenómenos.

En base a las evidencias se concluye que es preciso determinar la difusividad para cada sistema que se ensaye.

Capitulo II

Transferencia de materia a una malla

1. Objetivos

Siendo el objetivo final de este trabajo, el estudio de la transferencia de materia en lechos rellenos de mallas con fluidos no-Newtonianos, parece adecuado encarar previamente el desarrollo de experiencias donde se utilice una malla única.

La complejidad de la geometría que posee un lecho de mallas, y además, el hecho que las ecuaciones de movimiento para el caso de los fluidos no-Newtonianos tampoco son sencillas, son razones suficientes para comenzar por el estudio de un sistema más simple, cuyo comportamiento puede servir de base para interpretar los resultados obtenidos en lechos formados por varias mallas.

Por lo tanto, en este capítulo se describirán las experiencias realizadas con el fin de establecer cómo se modifica la transferencia de materia hacia una malla única, desde fluidos de distintas viscosidades y más aún, de comportamiento reológico diferente al de los fluidos Newtonianos como es el caso de los fluidos que responden a la ley de la potencia.

Para ello se determinaron los coeficientes de transferencia de materia y los datos experimentales se correlacionaron utilizando los números adimensionales que frecuentemente aparecen en este tipo de tratamiento obtenidos de aplicar un modelo adecuado al sistema en estudio, para el caso de los fluidos no-Newtonianos.

2. Parte experimental

2.1. Método de determinación de coeficientes de transferencia

El método electroquímico, que ya ha sido mencionado en 3.2.1. del Capítulo I, fue empleado en la determinación de los coeficientes de transferencia de materia.

A partir de las curvas corriente-potencial se eligió el potencial de trabajo para asegurar condiciones de corriente límite.

2.2. Propiedades de los electrolitos utilizados

Los coeficientes de transferencia de materia hacia una malla única se determinaron para varias soluciones, en presencia y ausencia de CMC. Algunas de ellas presentaban comportamiento Newtoniano y otras eran fluidos no-Newtonianos.

Las soluciones que fueron ensayadas en este caso son las denominadas A, BCL, BC, RC03, RC06, RC075, RC09, RC12, L1 y L15.

En el apartado 4 del capítulo I se hace referencia a estas soluciones y se resumen sus características (Tablas III y VI).

2.3. Descripción del equipo

Un esquema del equipo puede verse en la fig. II-1. El equipo utilizado en el desarrollo experimental de

///

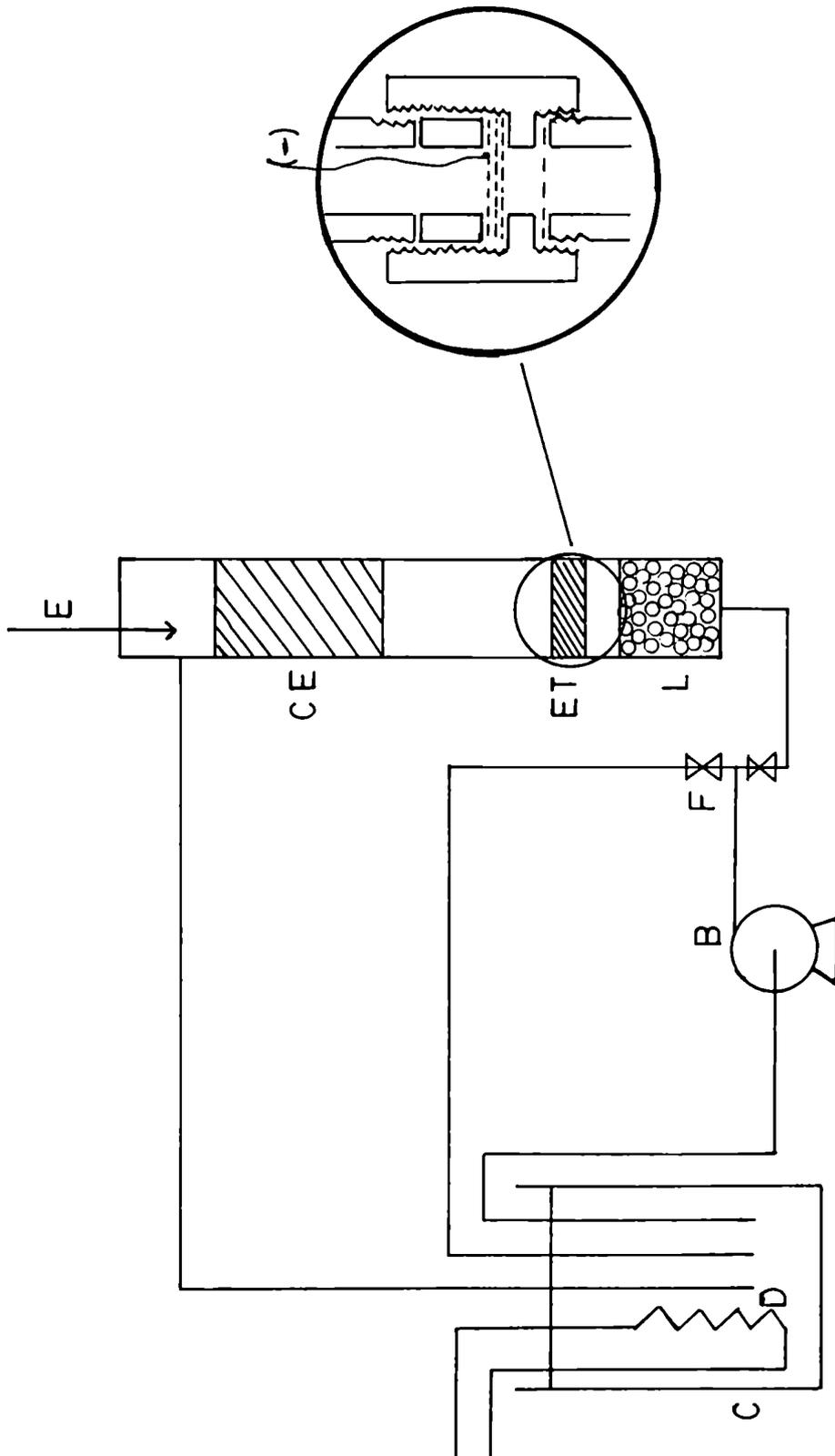


fig. II-I

este trabajo consta de una columna construída en acrílico de 5,2 cm de diámetro interno y 33 cm de altura.

A la entrada de la columna se encuentra una zona de calma (L), formada por un lecho de esferas de vidrio de 4 mm de diámetro.

El ánodo es una malla de acero inoxidable (CE) y el cátodo, una malla de bronce niquelado (ET).

La zona de la columna que contiene la malla fue diseñada de forma tal que permite intercambiar fácilmente la malla por otra de distintas características geométricas.

Completan el equipo, una bomba Salco Fleximpeller (B), un tanque de almacenamiento de ocho litros de capacidad (C), que contiene a la solución, donde ésta es termostatizada, haciendo uso de un serpentín (D) por el cual circula alcohol enfriado.

La temperatura se mide con un termómetro colocado en la misma columna (E).

2.4. Circuito eléctrico

El circuito eléctrico que se usó consta de:

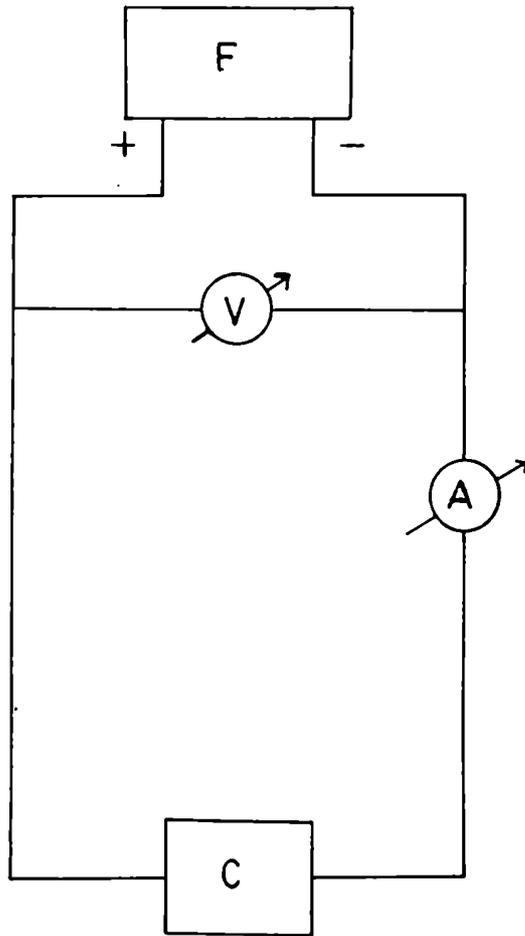
- Fuente de tensión regulada, marca Lambda LH-122 FM.
- Voltímetro de alta impedancia, marca Farnell, tipo TM 39.
- Miliamperímetro Hartmann y Braun.

En la fig. II-2 se muestra un esquema de este circuito.

2.5. Caracterización de las mallas

El electrodo de trabajo estaba constituido por una

///



F FUENTE
V MILIVOLTIMETRO
A MILIAMPERIMETRO
C COLUMNA

malla metálica que actuaba como cátodo.

Las mallas construídas con alambres de bronce fueron niqueladas electrolíticamente.

Las características geométricas de las mallas se determinaron experimentalmente siguiendo la técnica que propone Blass (1964), y se dan en la Tabla VII.

El área específica ψ se calculó a partir de las ecuaciones que se dan en ese mismo trabajo. En la Tabla VII también constan los datos de permeabilidad, cuya importancia se pondrá de manifiesto al hablar de lechos de mallas en el Capítulo III, donde se describirá la forma de calcularla.

Las mallas D y E para las cuales la separación entre alambres es más pequeña comparada con el resto de las mallas, solamente han sido utilizadas en la determinación de coeficientes de transferencia de materia en el caso de soluciones que no contienen polímero. En el flujo de soluciones de mayor viscosidad a través de estas mallas se produce retención de burbujas que invalidan las mediciones.

2.6. Experiencias realizadas

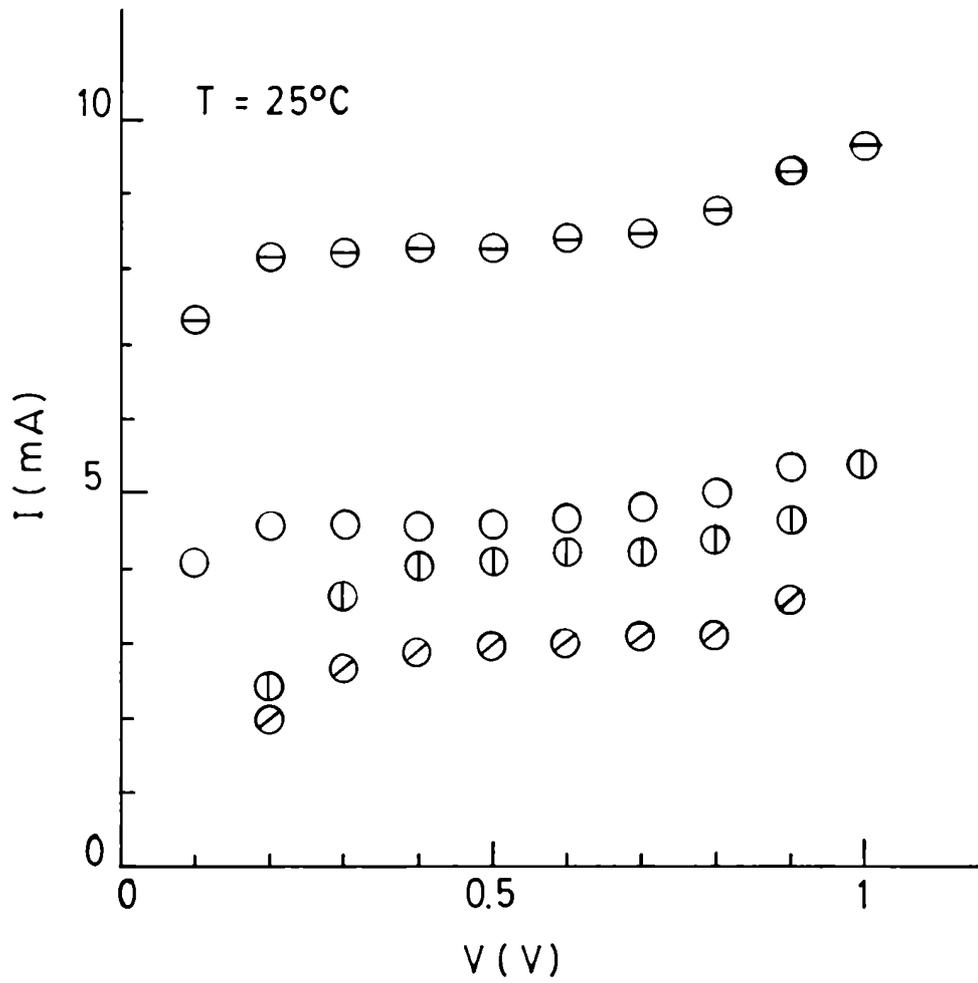
Las curvas de polarización se realizaron antes de cada experiencia para cada malla y a distintos caudales. Como ejemplo, en la fig. II-3 se muestran las curvas correspondientes a la malla A con las soluciones L15 y A.

En el desarrollo de cada experiencia se midieron intensidades de corriente límite a medida que se variaba el caudal, el cual se conocía midiendo volúmenes y tiempos, con probeta graduada y cronómetro respectivamente. De esa forma podían obtenerse los coeficientes de transferencia de mate-

ria para cada caudal.

Cada una de estas experiencias se repetía para cada malla y varias soluciones.

///



- ⊖ L15 48.36 l/min.
- L15 17.20
- ⊕ A 26.01
- ⊘ A 8.42

fig. II-3

3. Resultados

El cálculo de los coeficientes de transferencia de materia según la ecuación (I-4), está basado en el área de transferencia de la malla que a su vez se evalúa a partir de las características geométricas utilizando la siguiente expresión:

$$A = S \times \sigma \times \varphi$$

Los coeficientes de transferencia de materia obtenidos para cada fluido han sido representados gráficamente en función de la velocidad superficial del fluido en las figs. II-4 a II-13.

Para poder hacer un análisis sistemático de los datos, se los llevó a la forma de números adimensionales, logrando una representación más ordenada que permitió la comparación de los resultados de las distintas experiencias realizadas.

Sin embargo, la definición de tales grupos adimensionales no surgió en forma inmediata, dada la geometría compleja del sistema y el comportamiento no-Newtoniano de las soluciones L1 y L15.

Para visualizar el fenómeno se decidió imaginar al sistema como flujo de un fluido alrededor de un cuerpo sumergido; y al estar la malla constituida por una serie de alambres, se lo consideró como un caso de flujo transversal a cilindros. Por lo tanto se eligió el diámetro de alambre como longitud característica.

En base a estas consideraciones se adaptaron las de-

///

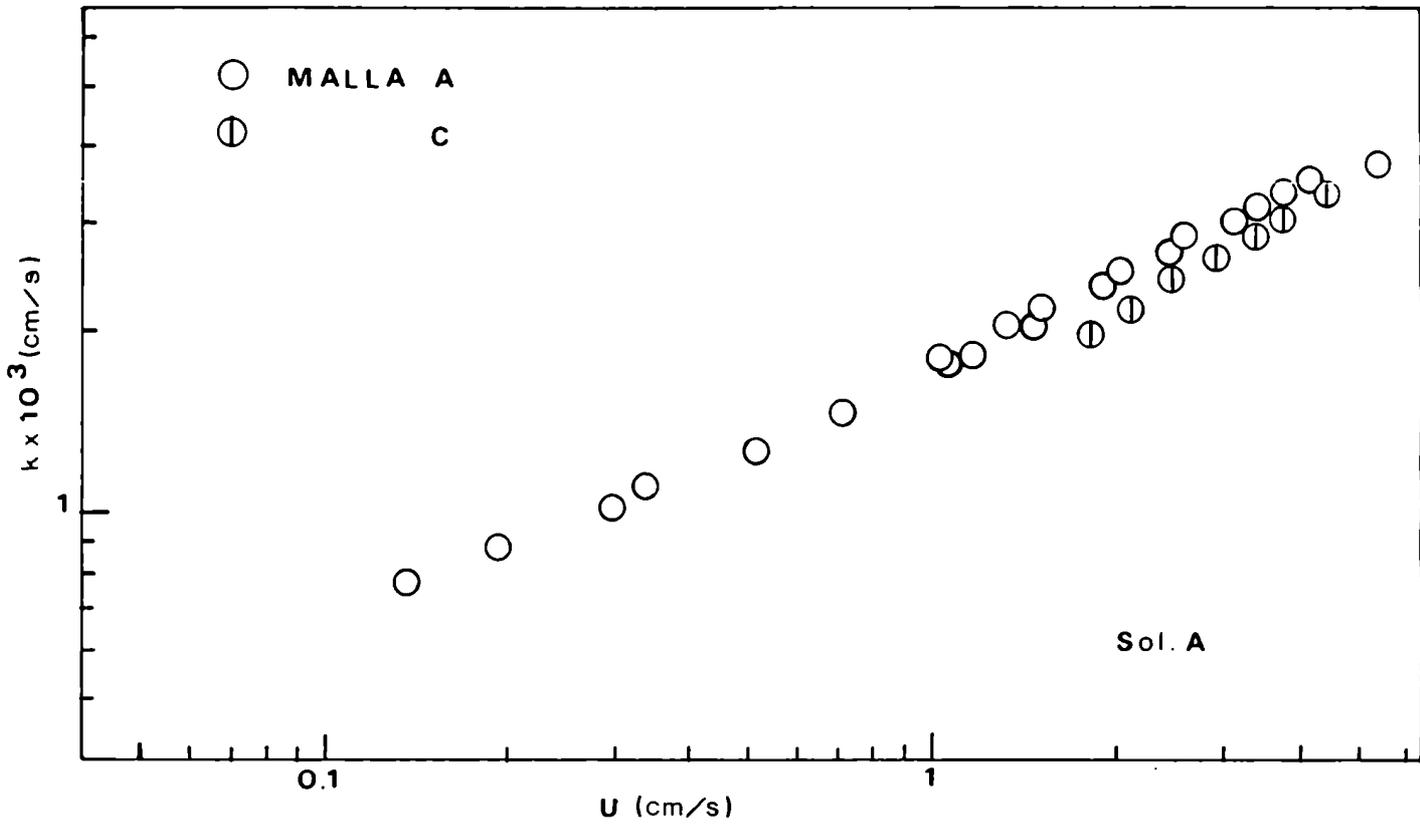


fig. II-4

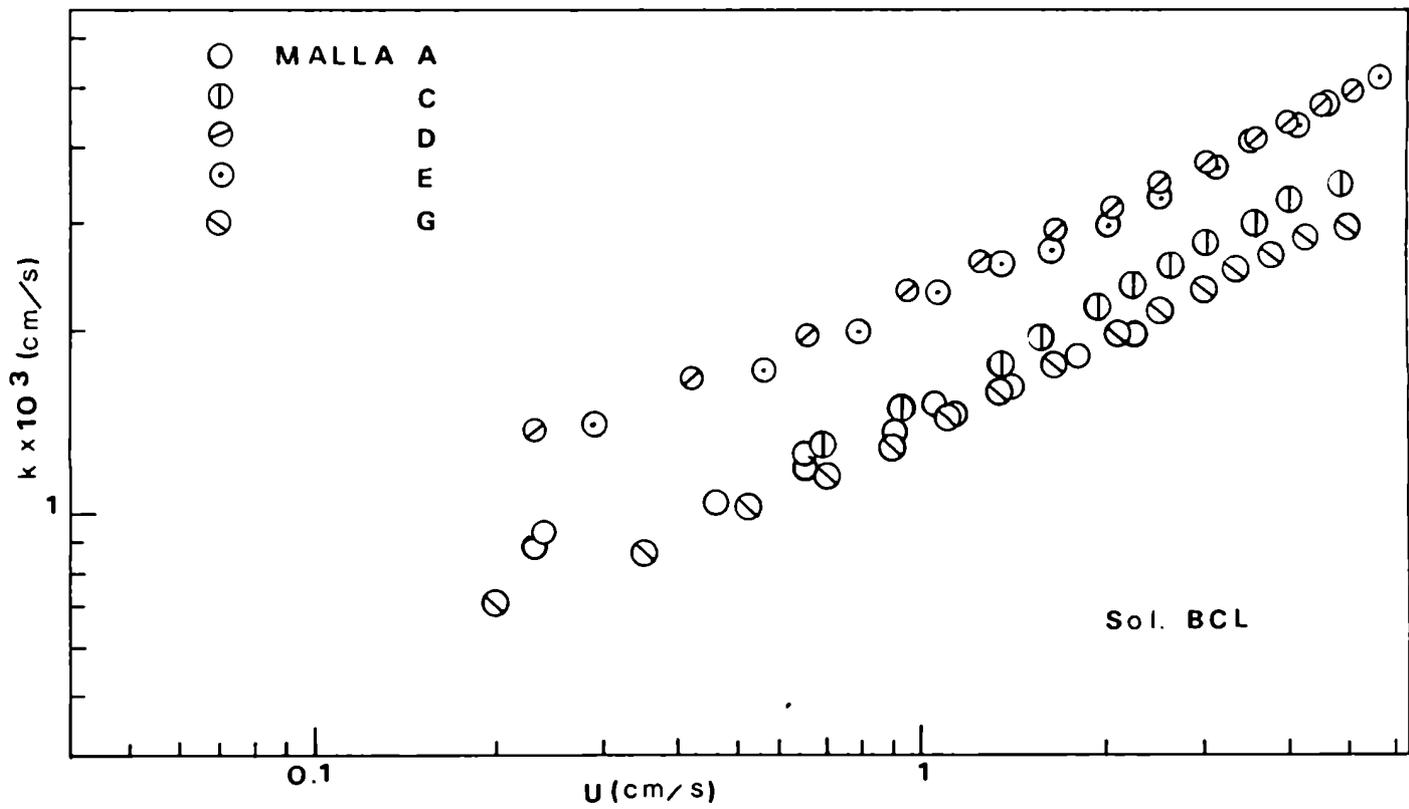


fig. II-5

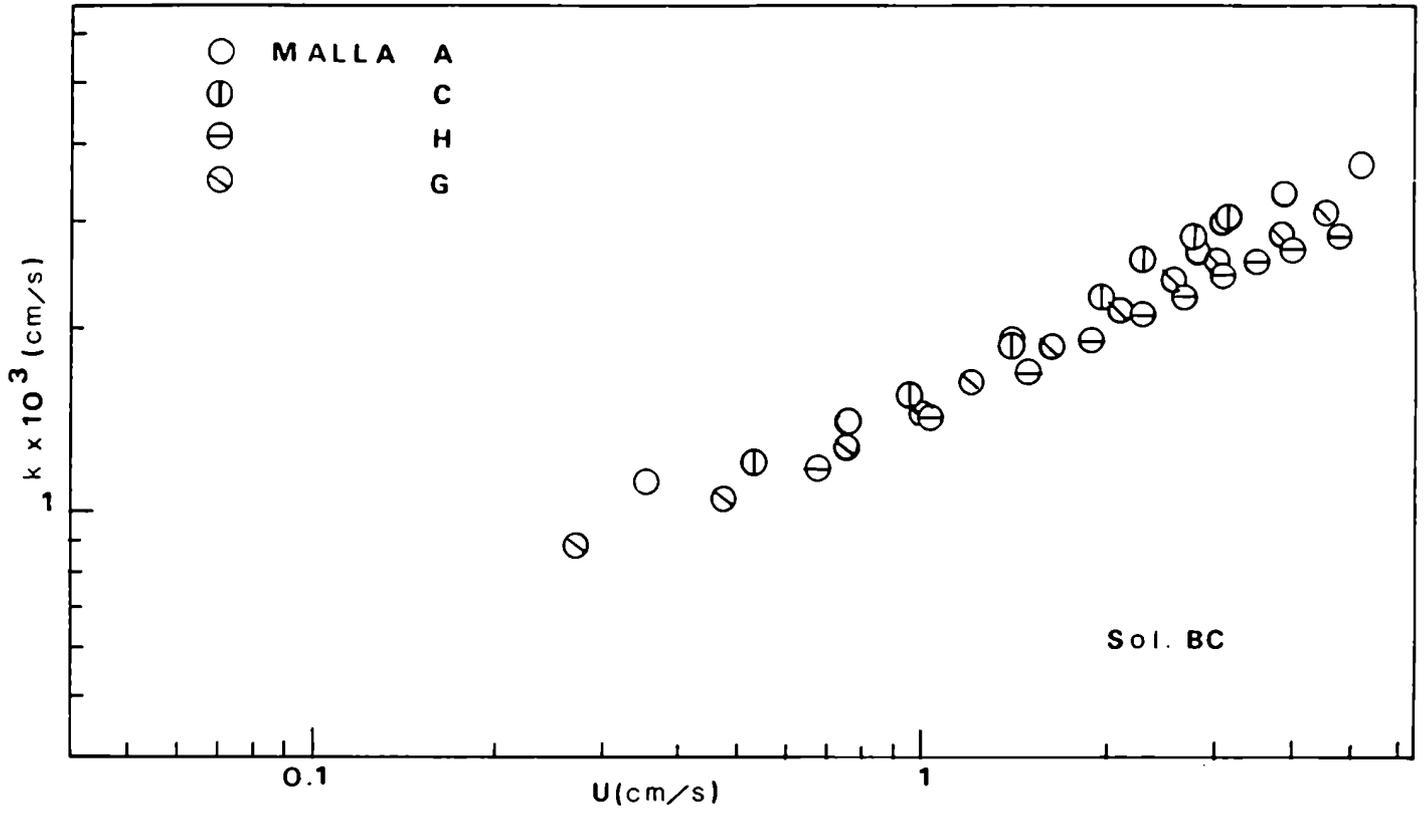


fig. II-6

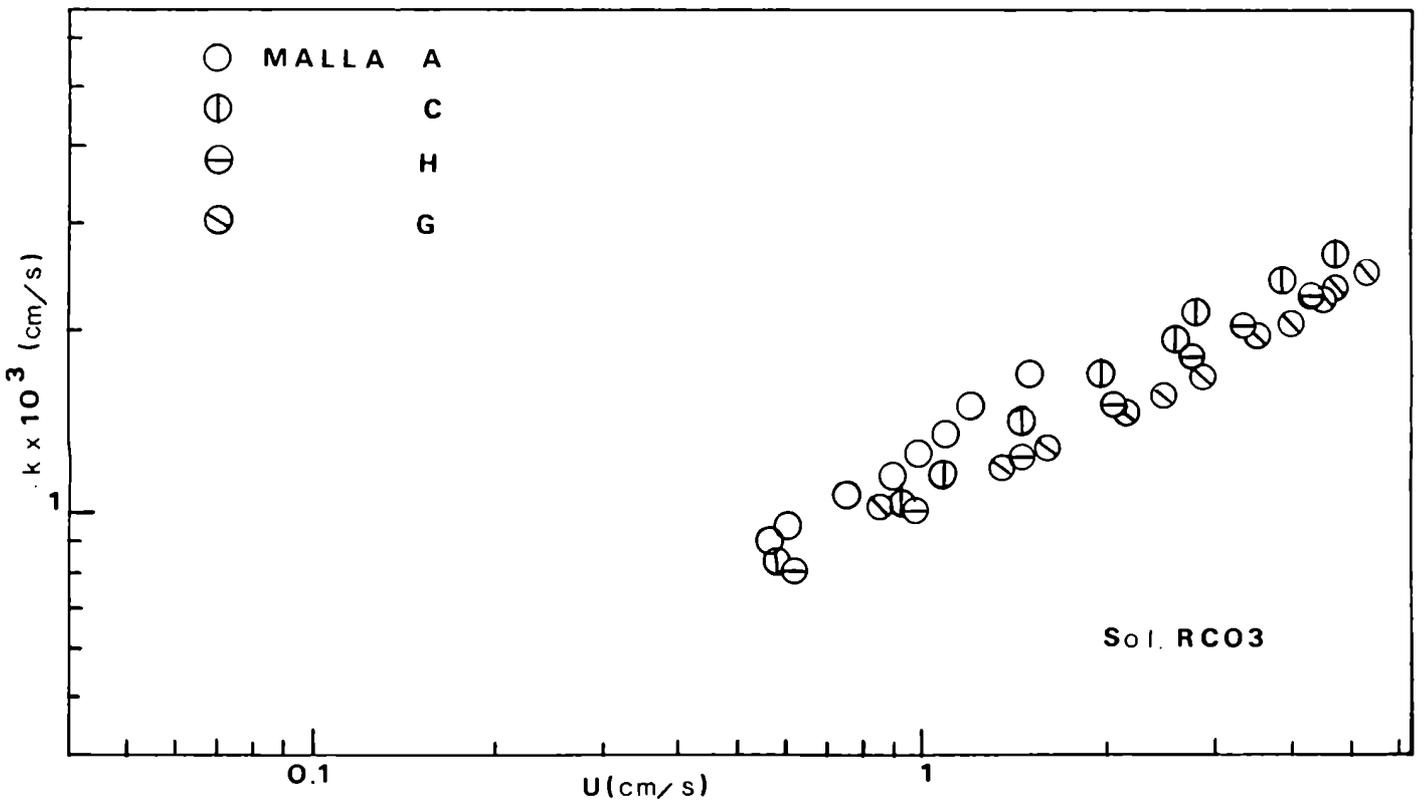


fig. II-7

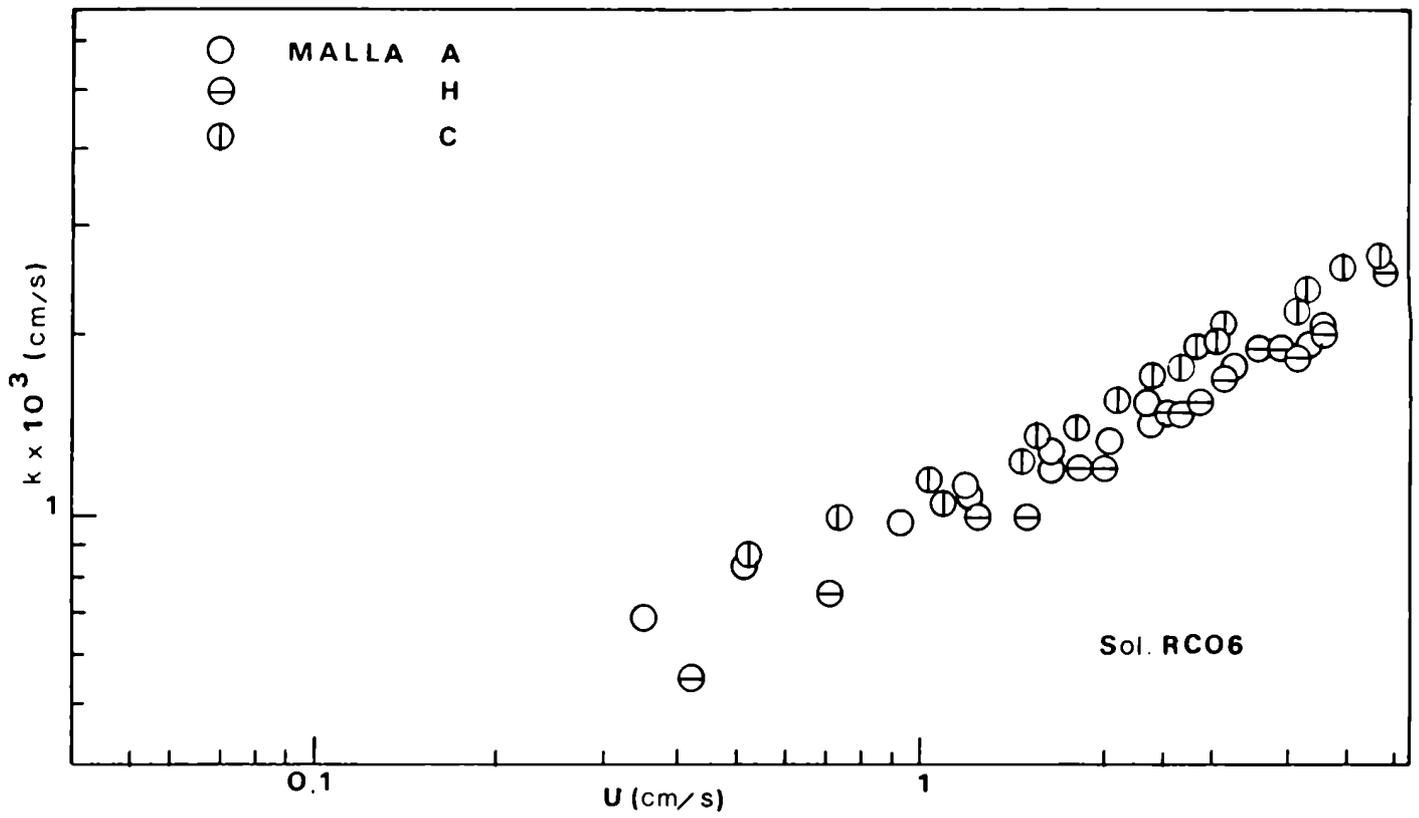


fig. II-8

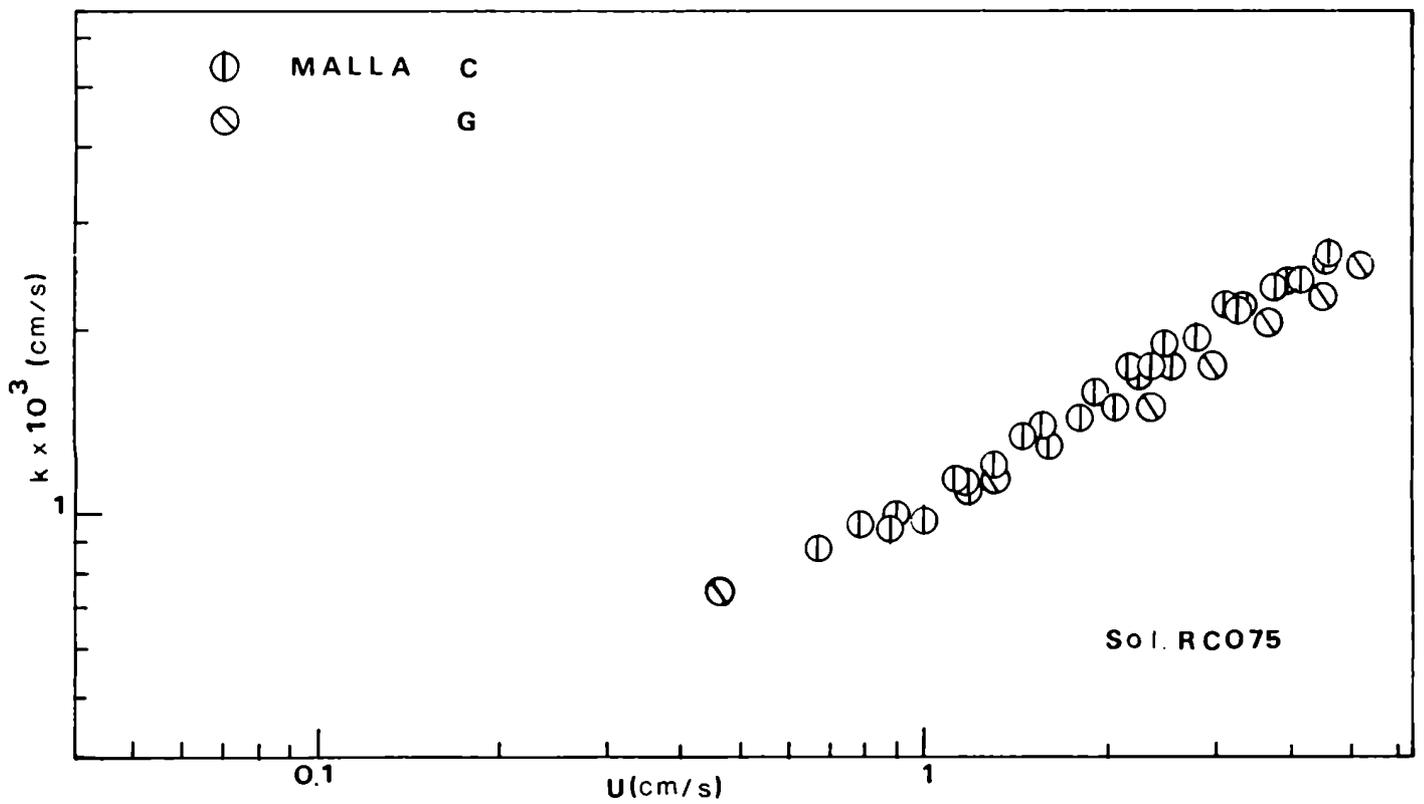


fig. II-9

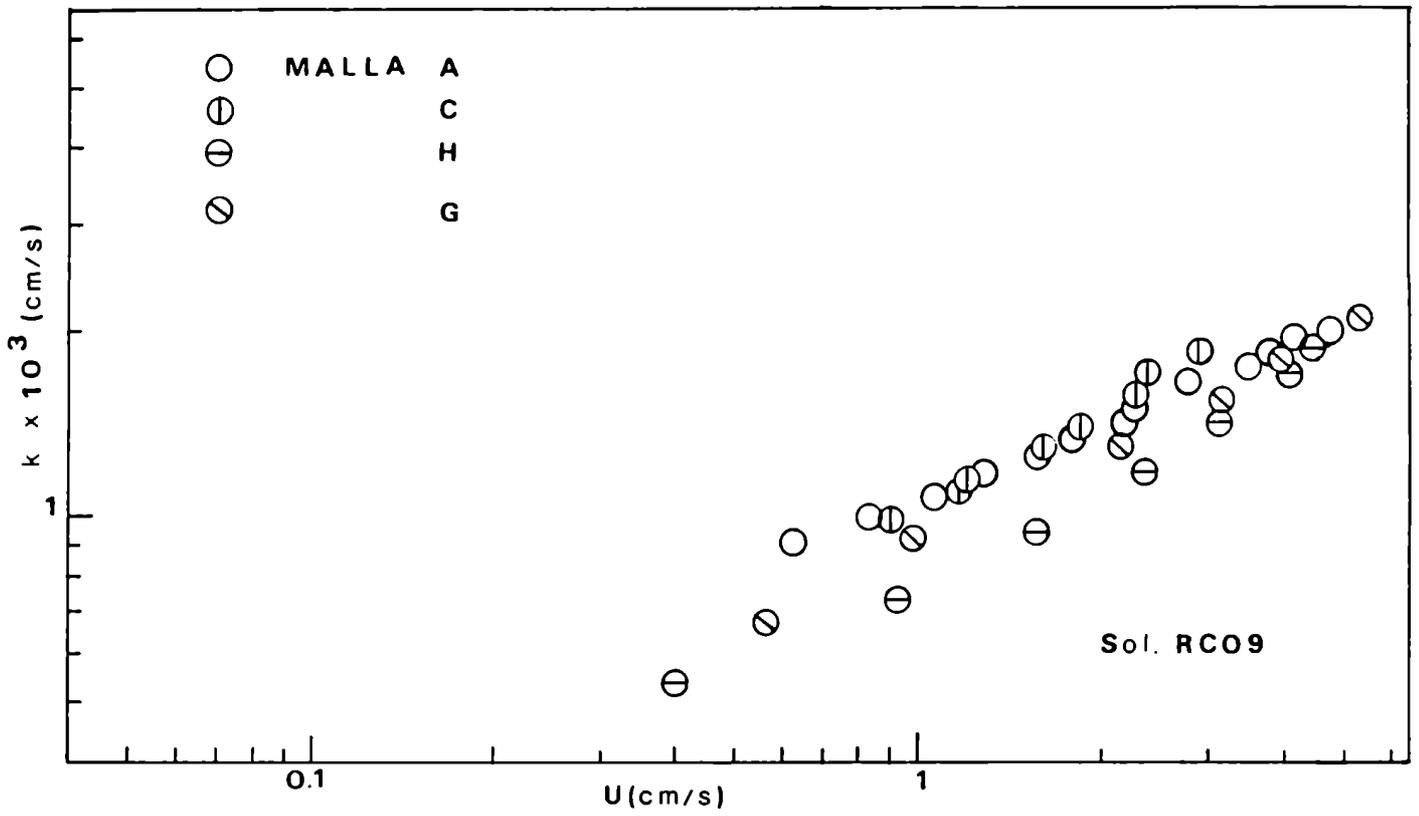


fig. II-10

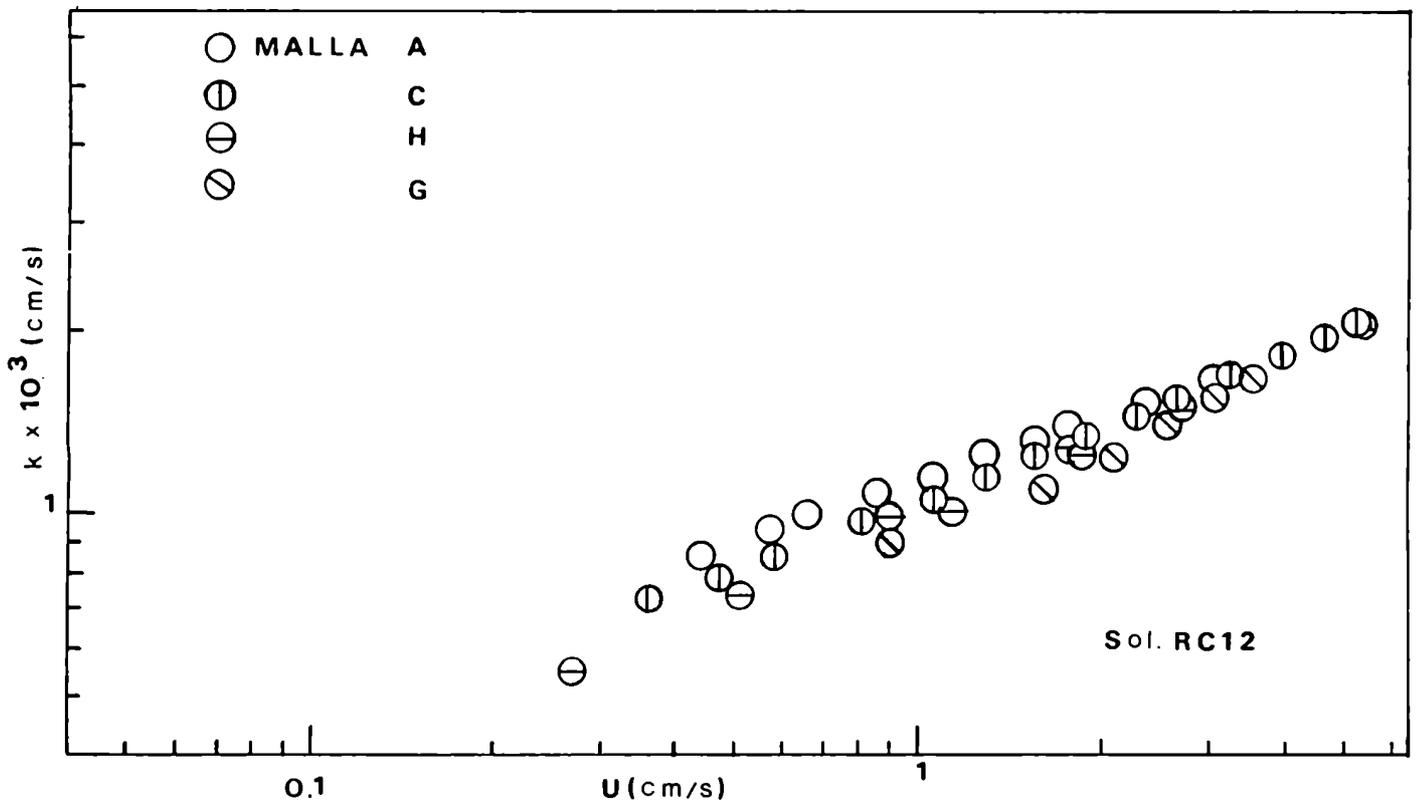


fig. II-11

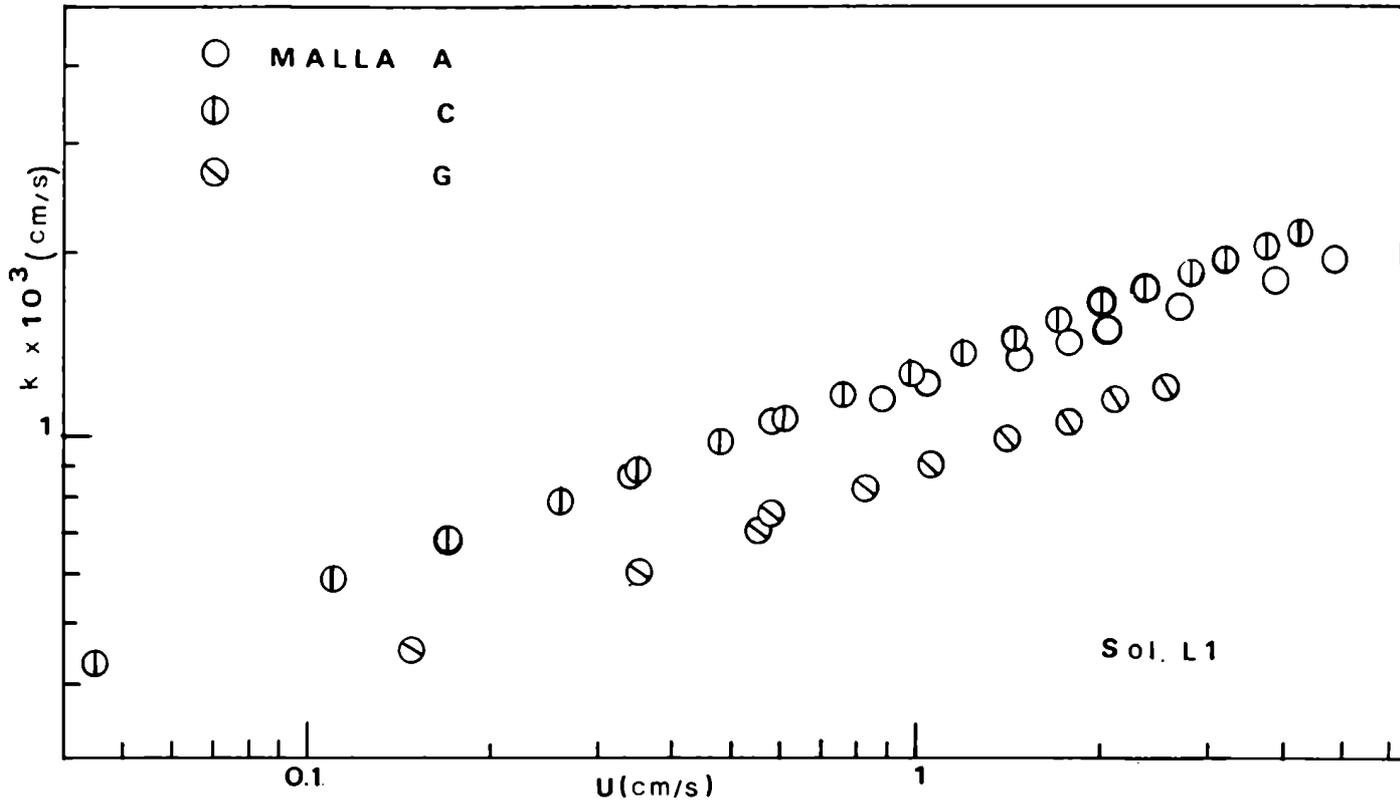


fig. II-12

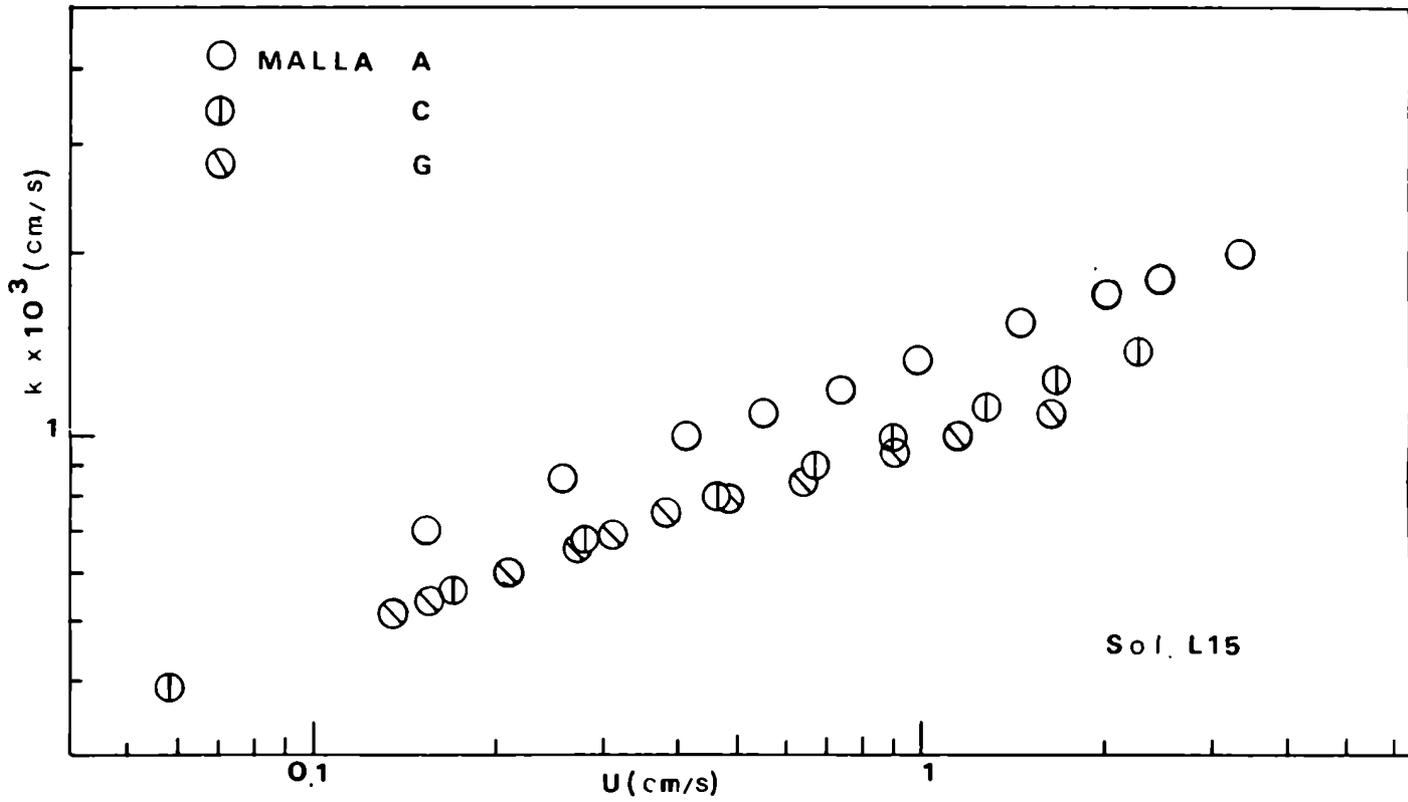


fig. II-13

finiciones de los números adimensionales deducidos por Kim y col. (1983) en un trabajo sobre transferencia de calor, en el cual se resuelven las ecuaciones de movimiento y energía para el caso de fluidos no-Newtonianos fluyendo alrededor de un cilindro.

Los resultados obtenidos por estos autores, adaptados a la transferencia de materia, llevaron a las siguientes definiciones del número de Reynolds, número de Sherwood y número de Schmidt:

$$Re_m = \frac{\int U^{2-n} d^n}{K}$$

$$Sh_m = \frac{k d}{D}$$

$$Sc_m = \frac{U d}{D Re_m^{2/n+1}}$$

Estos grupos adimensionales, se reducen a la expresión correspondiente a fluidos Newtonianos, cuando n toma el valor 1.

Para cada solución, la representación doble logarítmica de Sh_m vs Re_m corresponde a una recta (figs. II-14 a II-21) que permite proponer una relación del tipo:

$$Sh_m = m Re_m^x \quad (II-1)$$

Como los puntos correspondientes a todas las mallas se alinean sobre una única recta, arrojando un resultado ge-

///

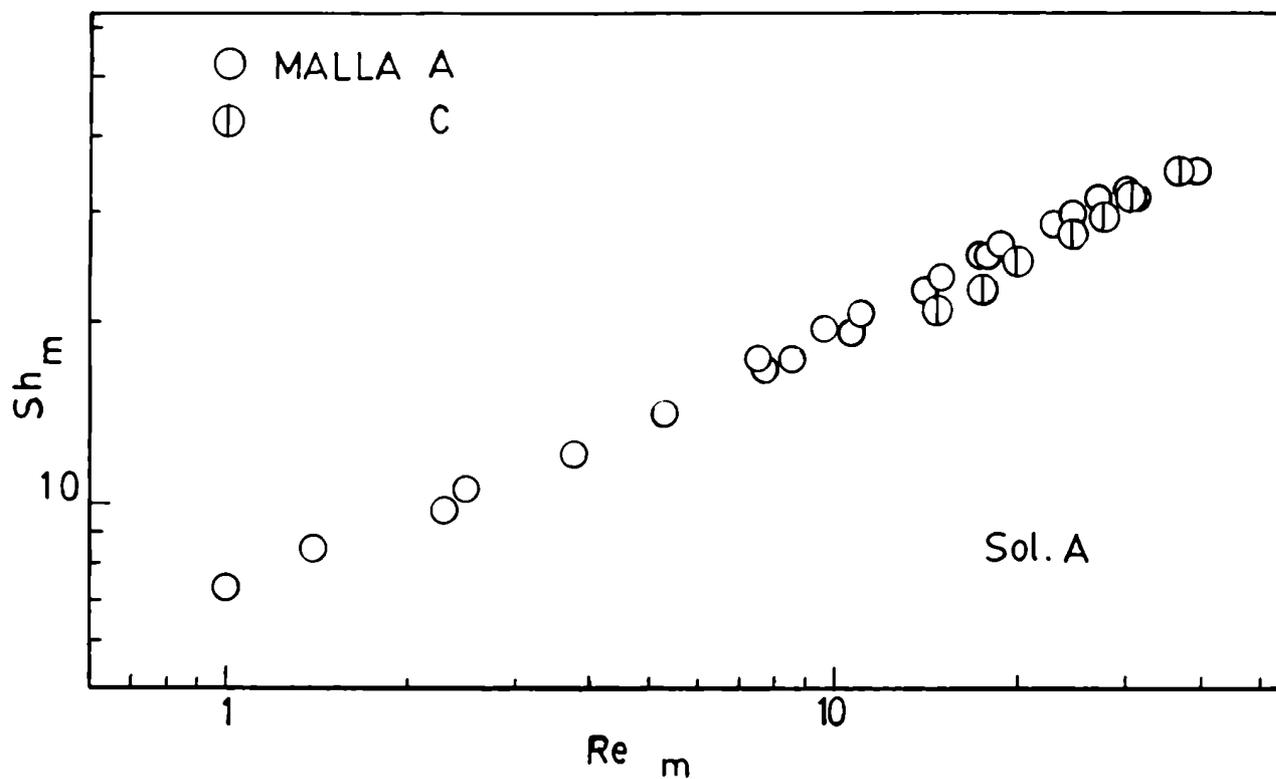


fig. II-14

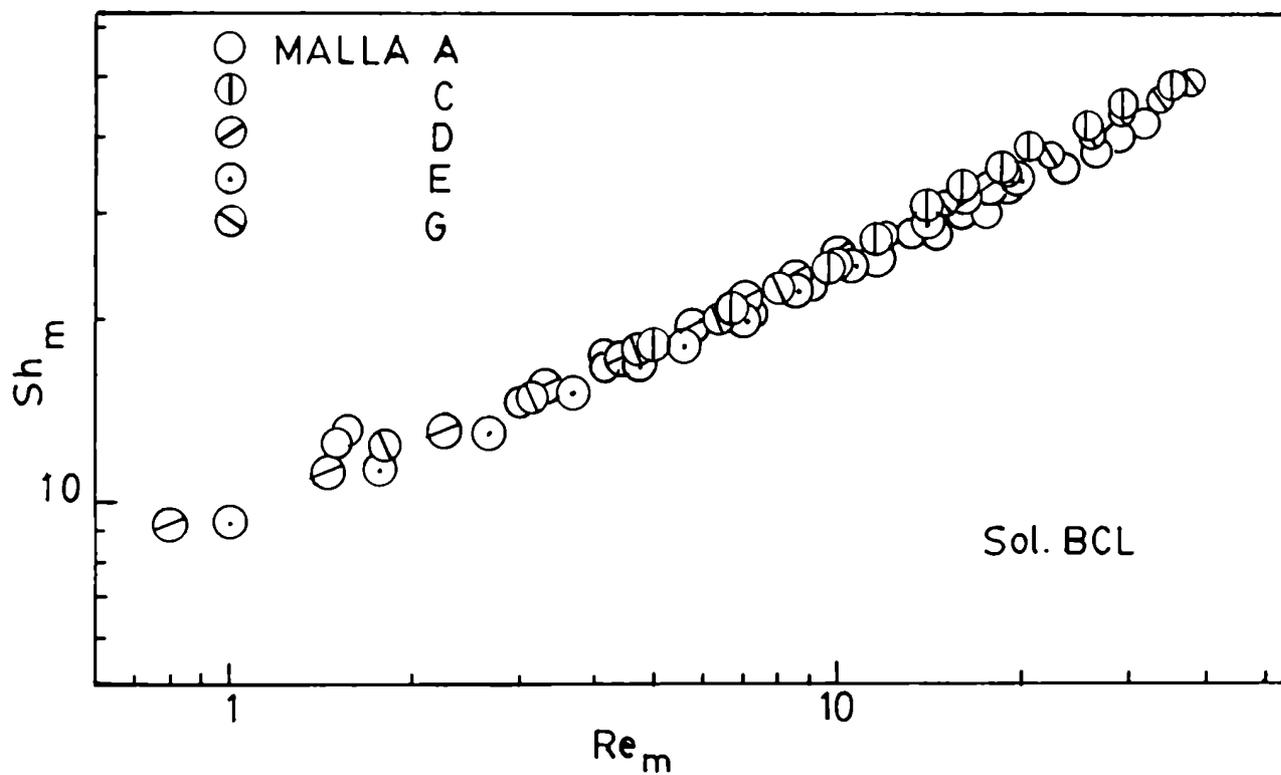


fig. II-15

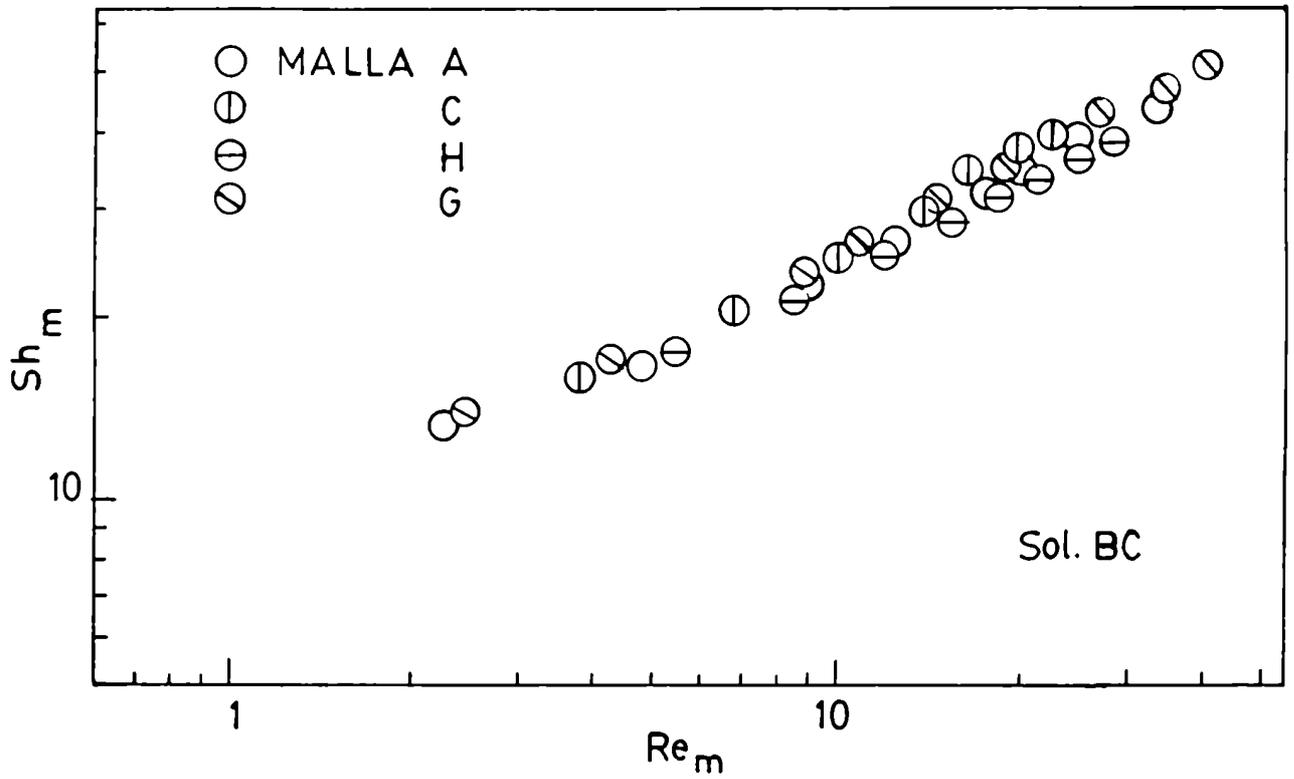


fig. II-16

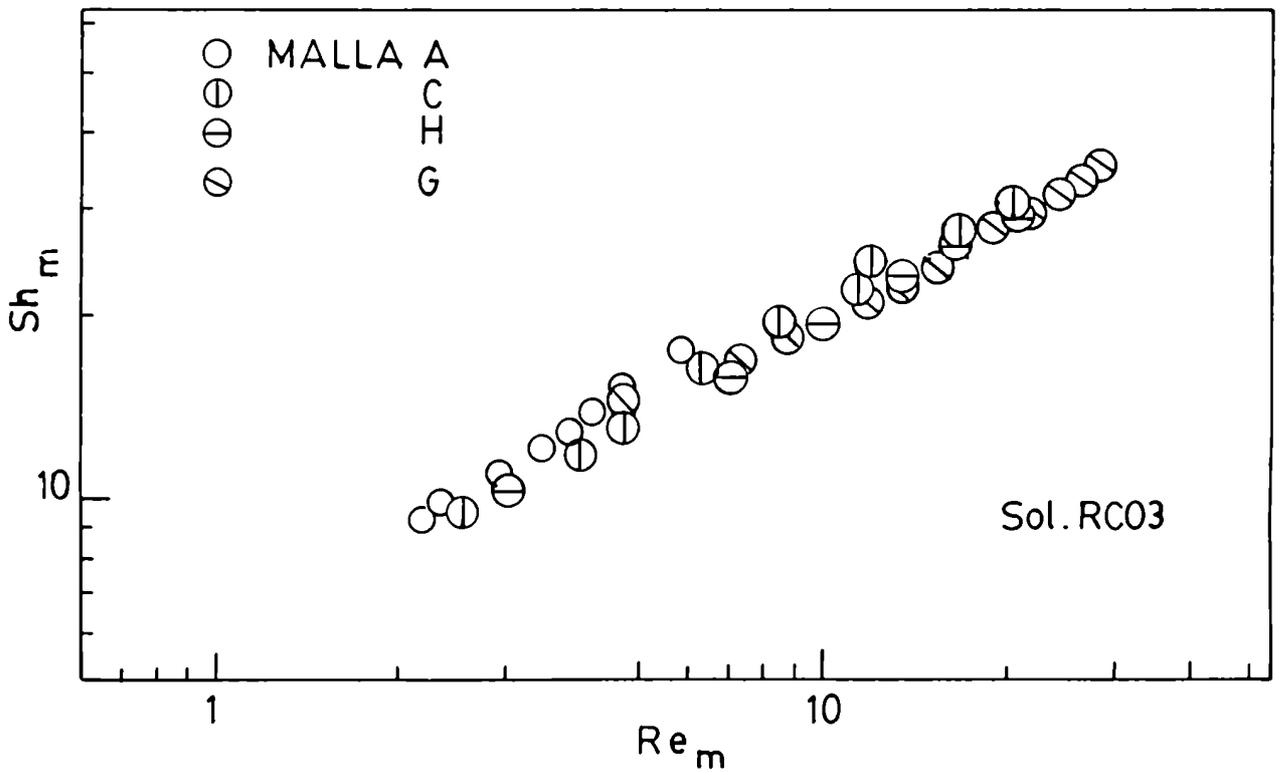


fig. II-17

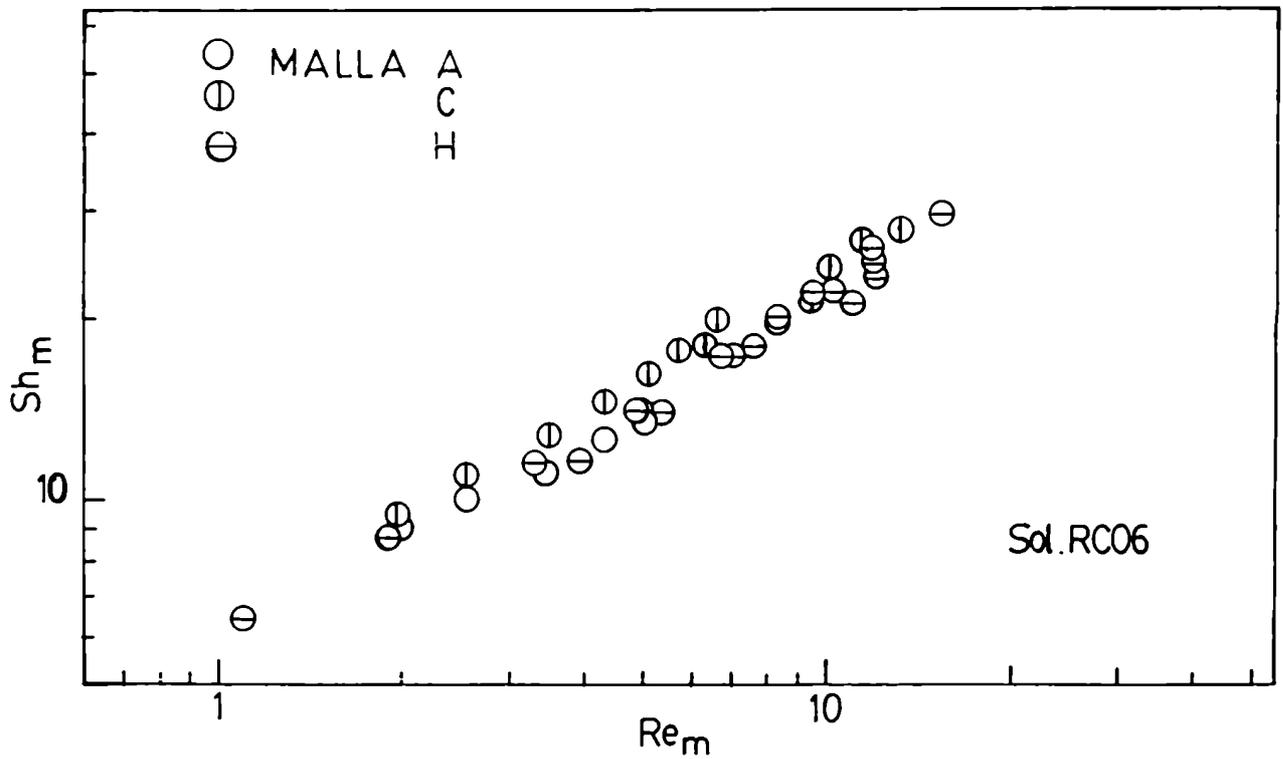


fig. II-18

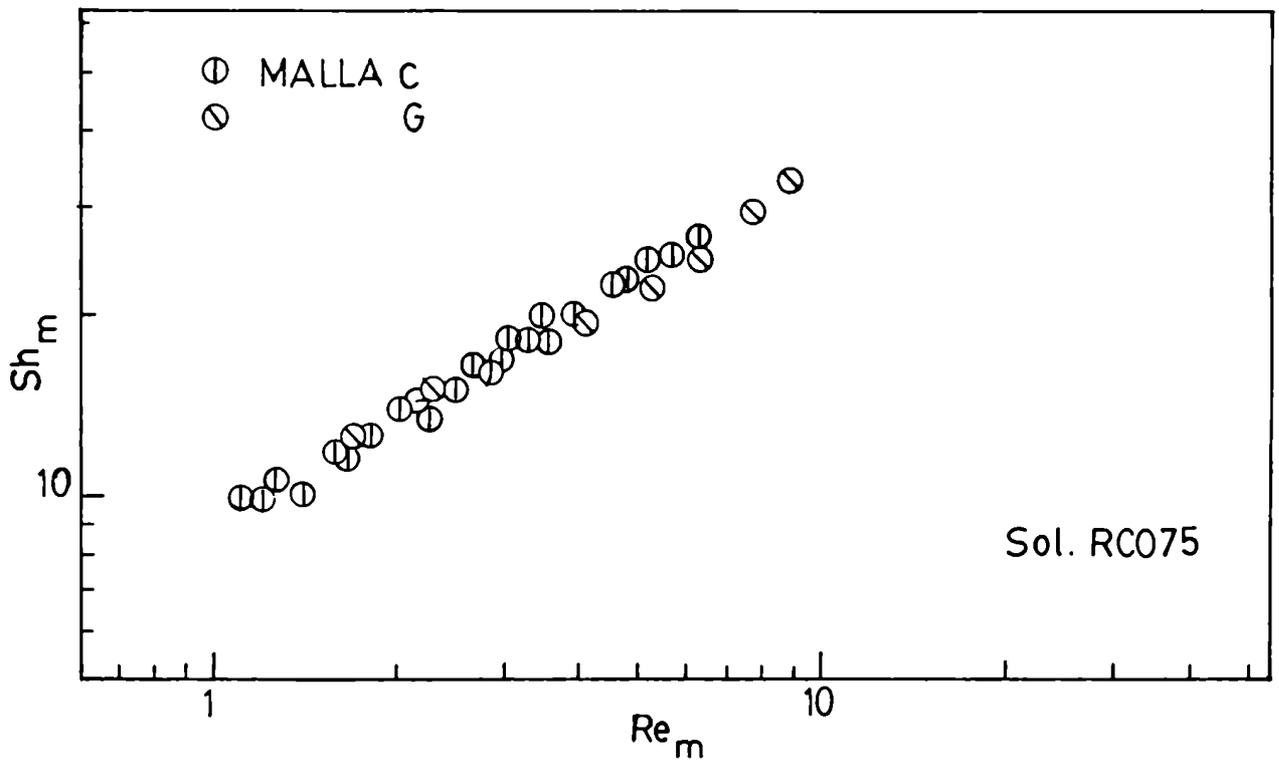


fig. II-19

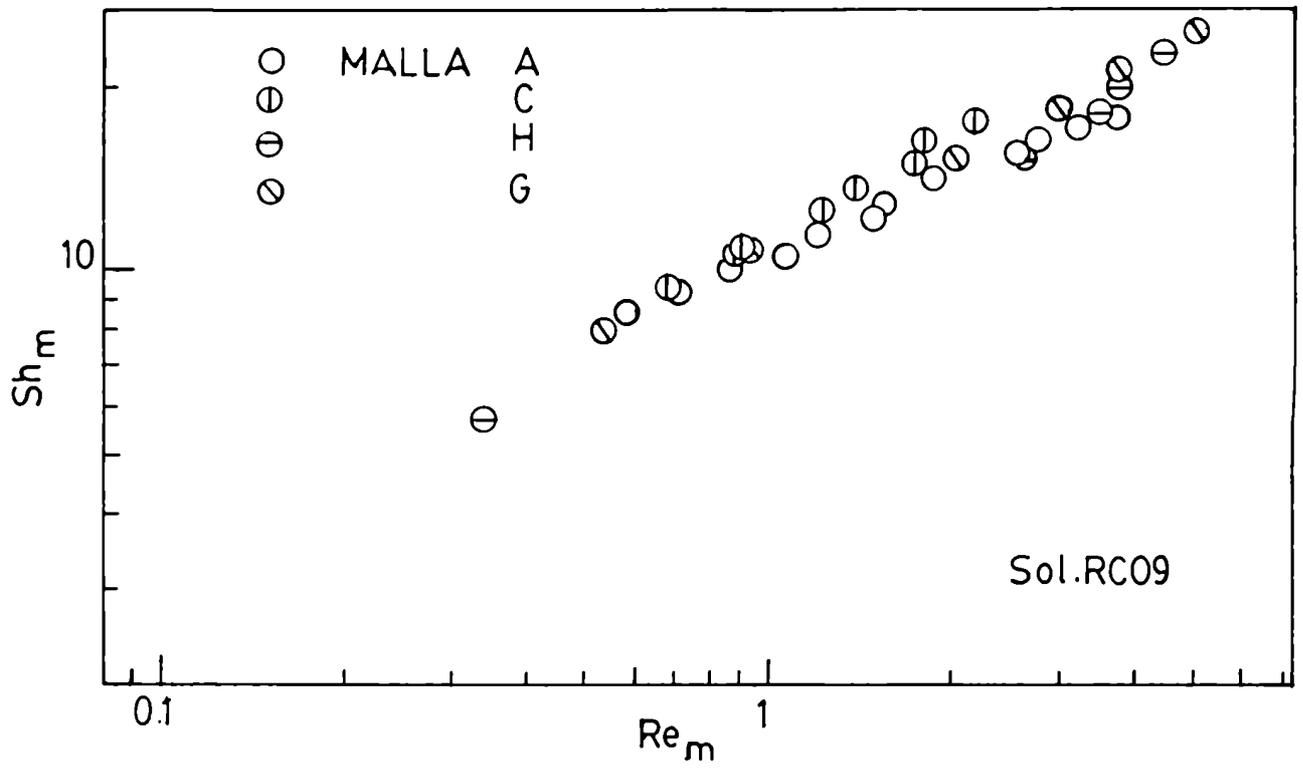


fig. II-20

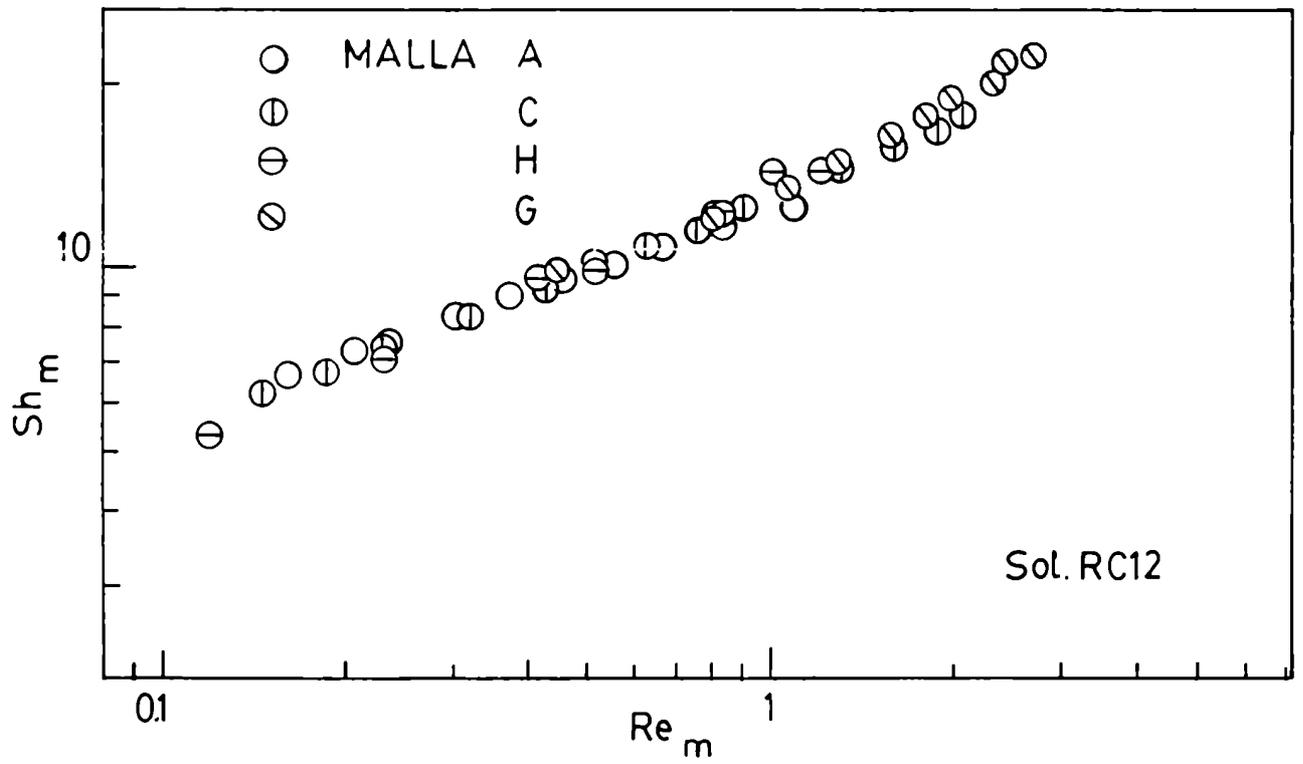


fig. II-21

neral con respecto a las mallas utilizadas, se demuestra que la longitud característica ha sido elegida correctamente.

Cabe aclarar que este tipo de representación no es posible para las soluciones L1 y L15 debido a que en la expresión del Sc_m para estas soluciones están involucradas la longitud característica y la velocidad superficial. Por lo tanto no es posible representar una relación entre Sh_m y Re_m solamente.

Para agrupar todos los datos en una sola línea, es necesario un parámetro de correlación adicional, que introduzca la influencia que las propiedades de los fluidos ejercen sobre la velocidad de transferencia de materia, lo cual se logra a través del número de Schmidt.

Se intentó correlacionar los datos obtenidos para todas las soluciones, aceptando que el número de Sherwood depende del número de Schmidt elevado al exponente 0,33 y con ese fin se calcularon y graficaron los valores de $Sh_m/Sc_m^{1/3}$ vs Re_m (fig. II-22).

En la fig. II-22 se puede observar que los datos se distribuyen en dos líneas separadas. En una de ellas se agrupan todos los puntos correspondientes a las soluciones A, BCL, BC, L1 y L15 (grupo A), en cuyas composiciones (Tablas II y IV) se pueden distinguir electrolitos soporte diferentes, concentraciones de electrolito distintas y desde el punto de vista de las propiedades reológicas, las dos últimas presentan comportamiento no-Newtoniano.

Sobre la otra recta se agrupan los puntos correspondientes a las soluciones RCO3, RCO6, RCO75, RCO9 y RC12 (grupo B).

///

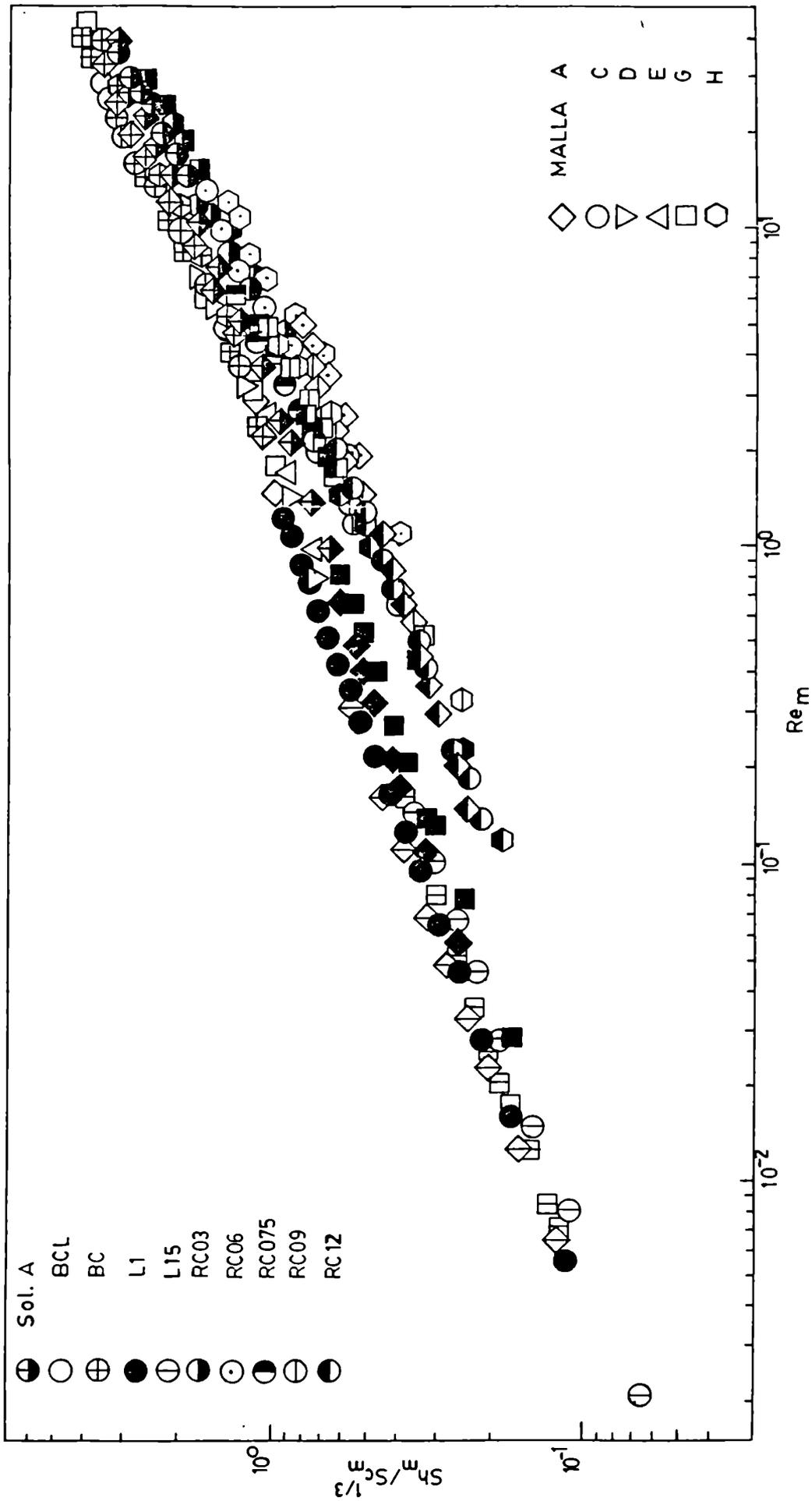


fig. II-22

De acuerdo con la forma en que se agrupan los puntos se decidió correlacionarlos separadamente; por un lado, los datos pertinentes al grupo B, y por otro lado, para el grupo A se encontraría una correlación para el rango de $Re < 2$ y otra para $Re > 2$ ya que se puede distinguir un cambio de pendiente.

Los resultados arrojados por este tratamiento, si se acepta una relación del tipo:

$$\frac{Sh_m}{Sc_m^{1/3}} = m' Re_m^{x'} \quad (II-2)$$

se resumen a continuación:

	Grupo A		Grupo B
	$2 \times 10^{-3} < Re_m < 2$	$2 < Re_m < 45$	$10^{-1} < Re_m < 30$
m'	0,770	0,674	0,481
x'	0,37	0,46	0,47

De los valores de los exponentes se deduce que la dependencia con el número de Reynolds es la misma para ambos grupos de soluciones en el rango de $Re > 2$.

Sin embargo como los datos experimentales no pueden reunirse en una única correlación, los resultados arrojados por el tratamiento matemático de los datos del grupo B serán considerados con reserva.

///

Al tratar de explicar estos resultados, hay que tener en cuenta que la procedencia del polímero empleado como espesante en ambos grupos de soluciones, es distinta (en un caso CMC de marca BDH y en el otro, marca ROSENCO) y cabe determinar cómo este hecho afecta a la transferencia de materia.

El estudio de la transferencia de materia en el lecho de mallas puede brindar más información sobre este punto en particular.

///

4. Conclusiones

Se determinaron los coeficientes de transferencia de materia para diversas mallas y varias soluciones. Algunas soluciones presentan comportamiento no-Newtoniano que responde a la ley de la potencia.

Aplicando al sistema un modelo de flujo alrededor de objetos sumergidos (transversal a cilindros), modificado para fluidos no-Newtonianos se logró correlacionar los datos fijando el exponente del Sc_m en 0,33.

Las correlaciones obtenidas para el grupo A de soluciones son:

$$Sh_m = 0,770 Sc_m^{0,33} Re_m^{0,37} \quad 2 \times 10^{-3} < Re_m < 2$$

$$Sh_m = 0,674 Sc_m^{0,33} Re_m^{0,46} \quad 2 < Re_m < 45$$

En el Capítulo III se estudiará la influencia de los espesantes utilizados.

Capítulo III

Transferencia de materia en lechos de mallas

1. Objetivos

El propósito del estudio descrito en este capítulo es investigar la influencia del comportamiento no-Newtoniano del fluido sobre la transferencia de materia en el flujo a través de lechos rellenos de mallas.

Con ese objeto se determinaron los coeficientes de transferencia de materia para soluciones de electrolito con el agregado de un polímero que les confiere comportamiento reológico correspondiente a la ley de la potencia.

Un tratamiento analítico del fenómeno de la transferencia de materia en lechos rellenos con el flujo de este tipo de fluidos no parece posible por el momento, a causa de la compleja geometría del sistema y la extrema dificultad encontrada en la resolución de las ecuaciones de movimiento.

En cambio, mediante la aplicación de modelos adecuados al lecho relleno y su adaptación para el caso de fluidos de la ley de la potencia, se propone una forma simple de correlacionar los datos experimentales, que ayudará a entender mejor este fenómeno, ya que se obtendrán los grupos adimensionales que son relevantes en la evaluación de los efectos reológicos sobre la transferencia de materia.

2. Parte experimental

En los Capítulos I y II se ha descrito el método de determinación de los coeficientes de transferencia de materia y también el equipo experimental y el circuito eléctrico.

La columna posee un dispositivo que puede contener una o varias mallas que pueden ser intercambiadas fácilmente (fig. II-1).

En esta etapa del trabajo se forman los lechos con cinco o seis mallas. Las mismas se superponen unas a otras y se prensan en la periferia mediante una pieza de acrílico de geometría anular para asegurar un buen contacto entre ellas.

Con respecto a las soluciones de electrolito empleadas en esta parte del trabajo, no son las mismas que se utilizaron en el estudio de transferencia de materia a una malla única.

Los ensayos realizados con dichas soluciones en un sistema constituido por una malla única, permitían asegurar condiciones de corriente límite; pero eso no ocurre cuando el lecho está formado por varias mallas. En este caso la caída de potencial mayor que se produce debido al aumento del área de transferencia del lecho y de ahí, de la intensidad que circula, hace que partes del electrodo trabajen fuera del rango de corriente límite.

Por lo tanto, se decidió disminuir la concentración de ferricianuro y ferrocianuro de potasio a 10^{-3} M, para reducir de esta forma la intensidad de corriente y por ende la caída óhmica de potencial.

Las soluciones utilizadas fueron las llamadas A, BCL,

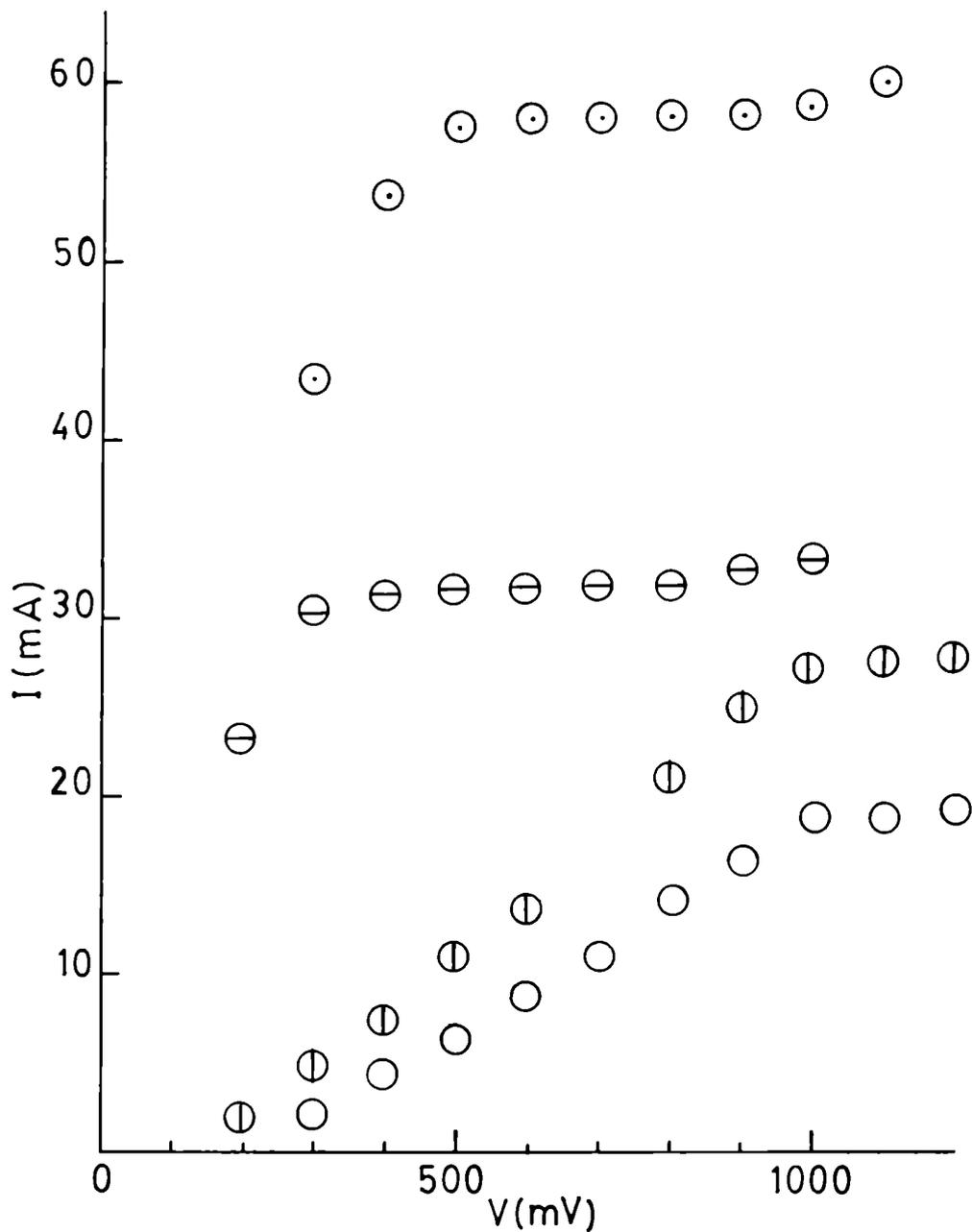
///

RCLO3, RCLO75, RCL12, L1 y L15 y sus propiedades aparecen en las Tablas IV y VI.

Con estas soluciones se realizaron las curvas de polarización, algunas de las cuales se muestran como ejemplo en la fig. III-1.

Las experiencias se desarrollaron en la misma manera que aquellas para el caso de una sola malla y se determinaron los coeficientes de transferencia de materia en función de la velocidad del fluido a 25°C.

En las figs. III-2 a III-8 se representaron gráficamente dichos valores.



- ⊙ Sol. A 4,16 l/min
- ⊖ 0,93
- ⊕ Sol. C 1,64
- 0,43

fig. III-1

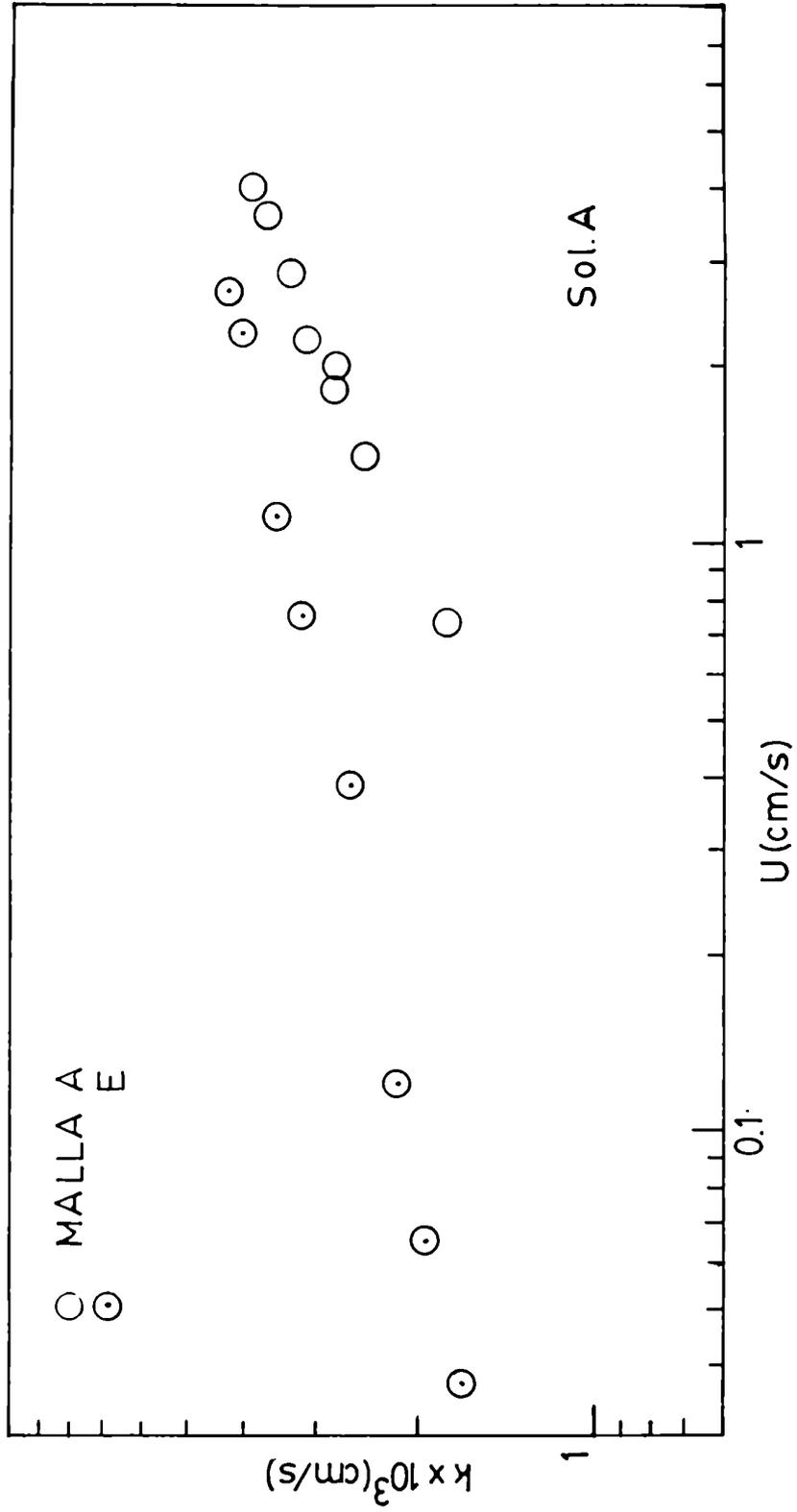


fig. III-2

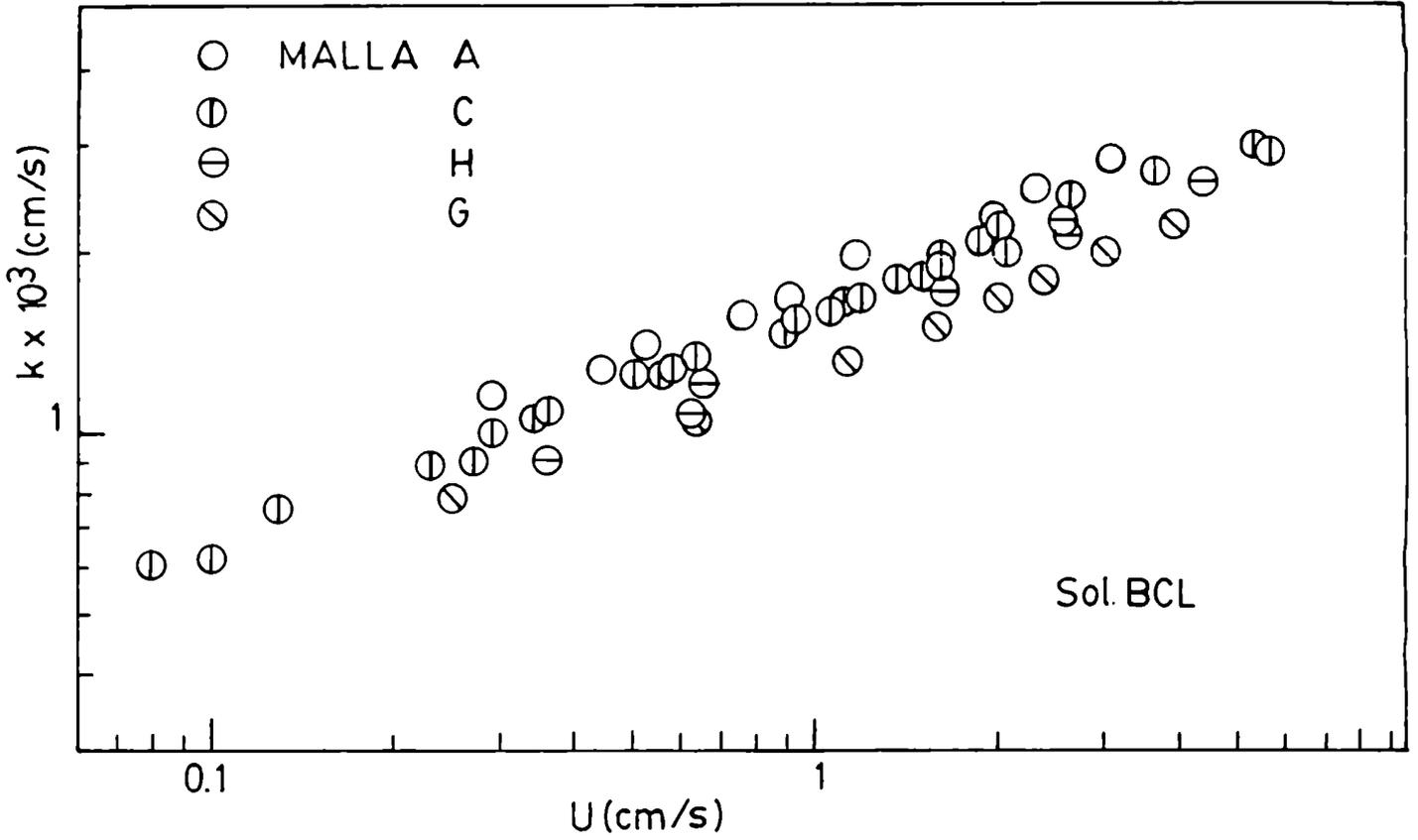


fig. III-3

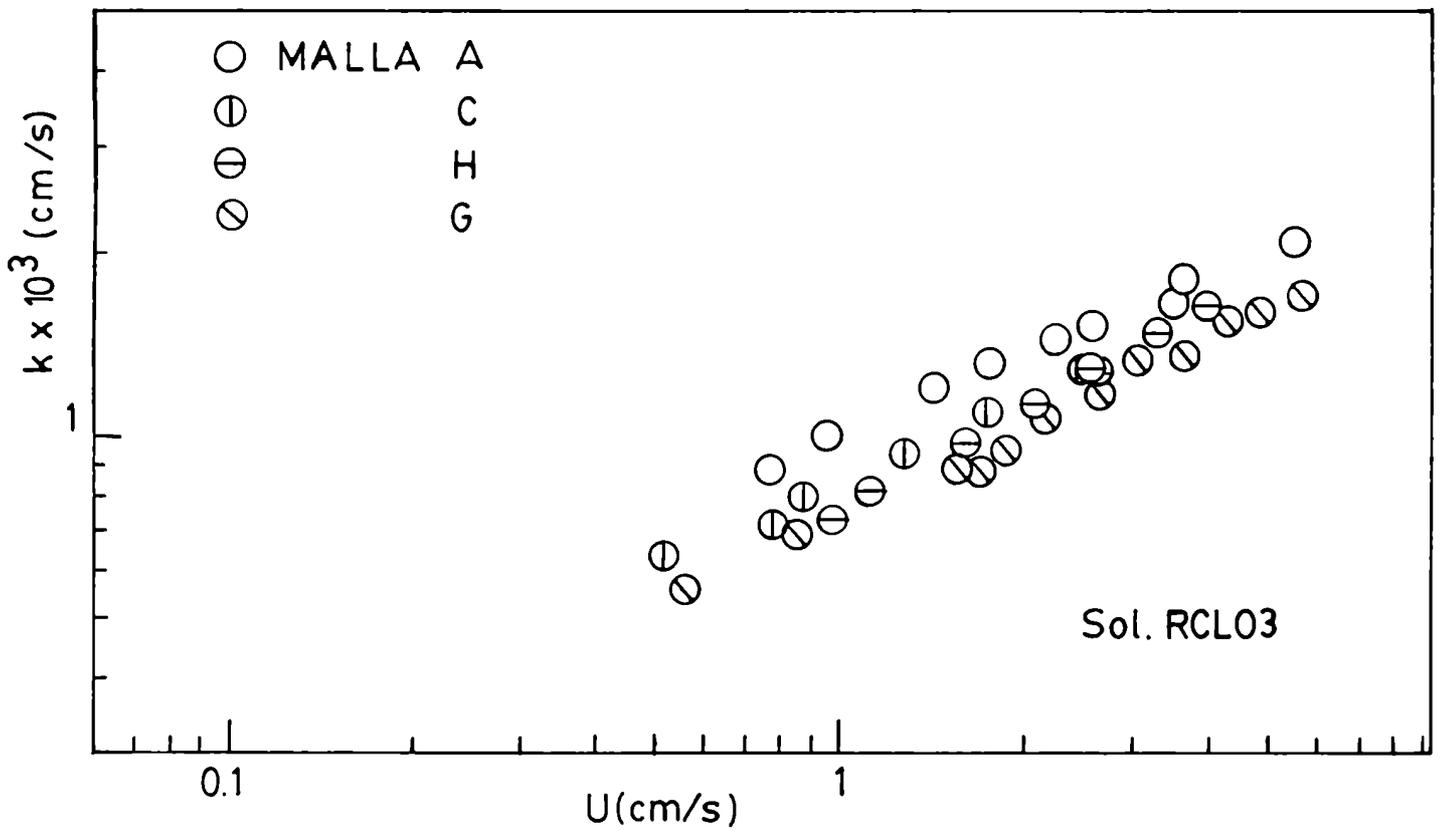


fig. III-4

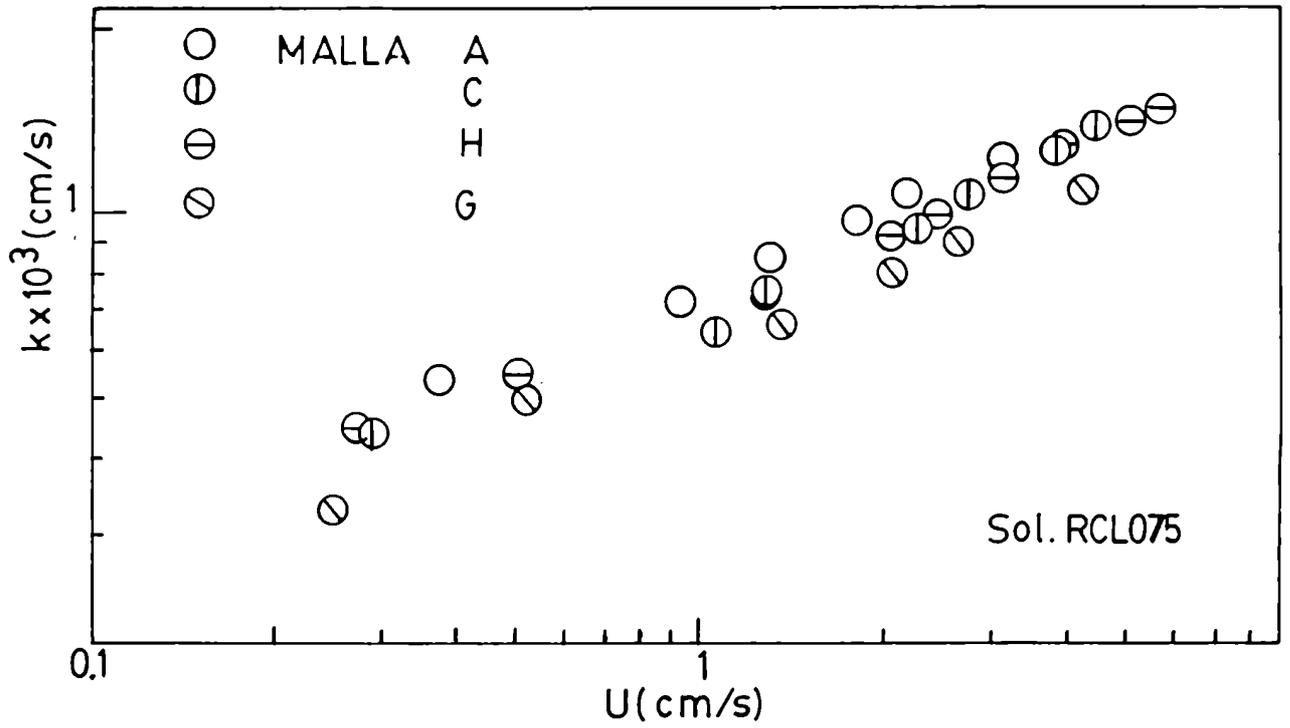


fig. III-5

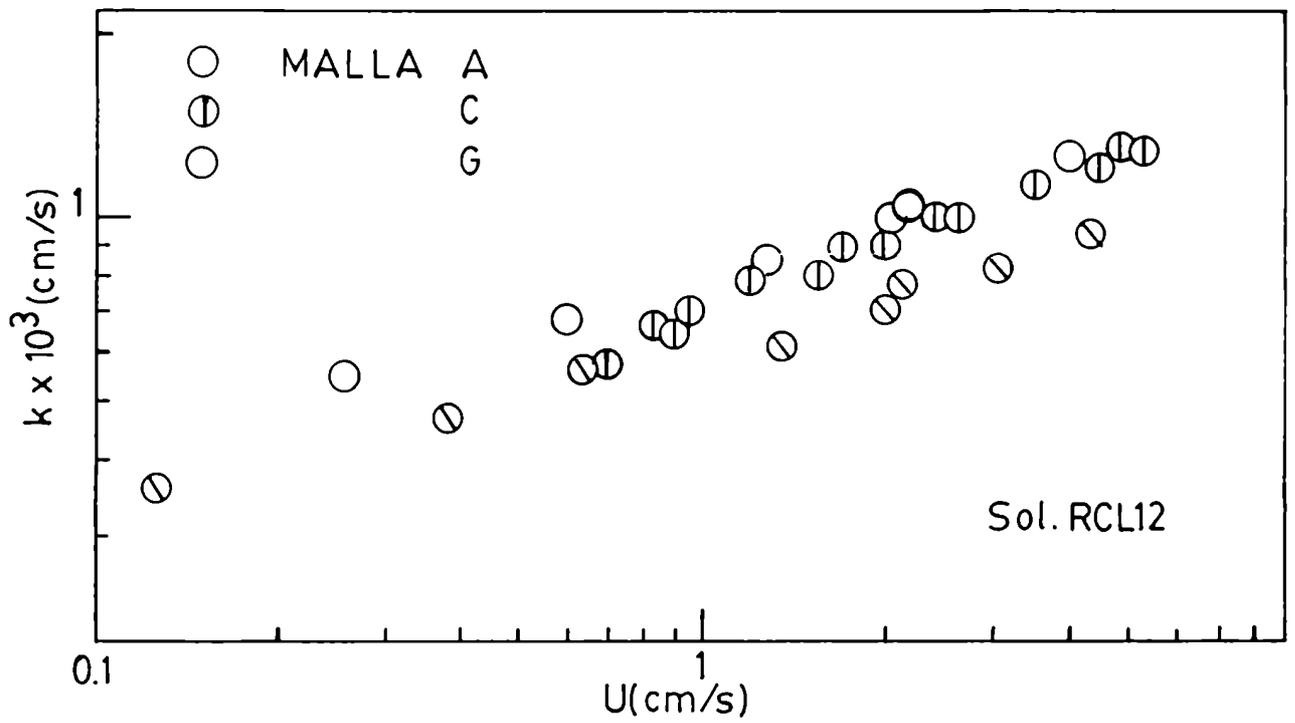


fig. III-6

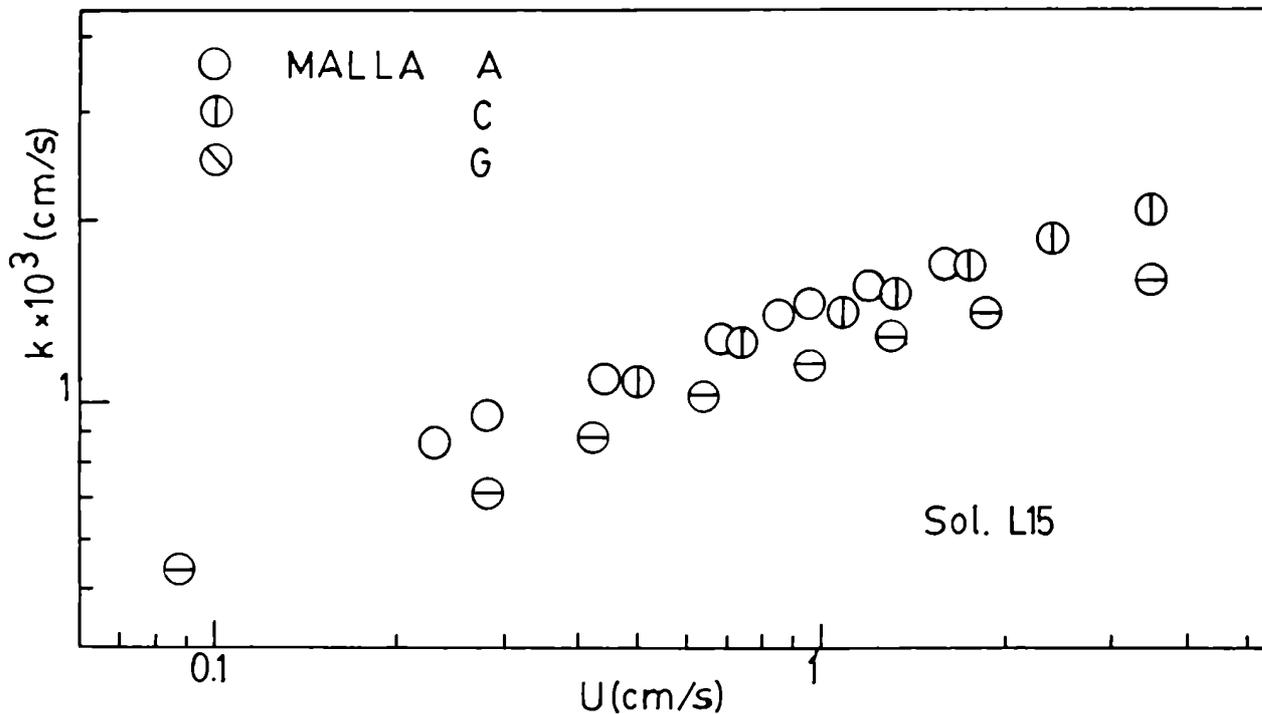


fig. III-7

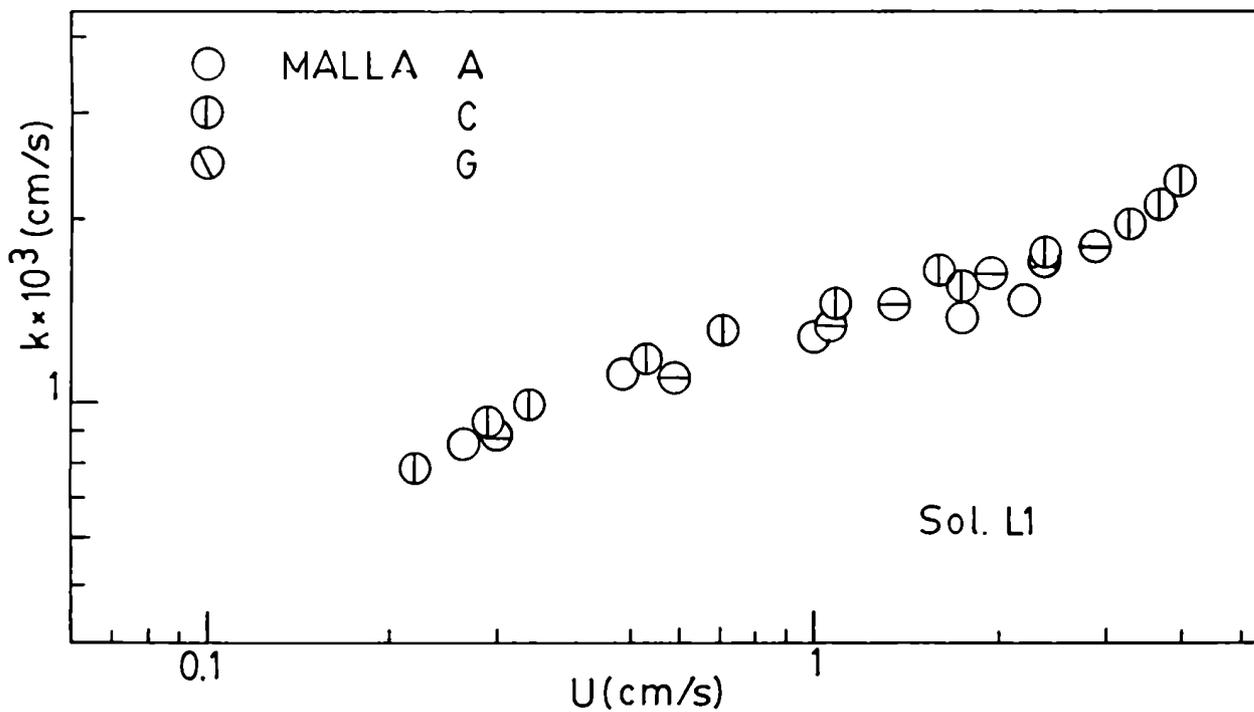


fig. III-8

3. Resultados

Los coeficientes de transferencia de materia obtenidos en función de la velocidad del fluido en lechos de mallas se llevaron a la forma de grupos adimensionales con el fin de correlacionarlos.

En base a las conclusiones extraídas del Capítulo II, se tratará de correlacionar primero los datos experimentales obtenidos con las soluciones que no contienen espesante y las no-Newtonianas, dejando de lado las soluciones que contienen CMC marca ROSENCO.

El modelo de flujo alrededor de cilindros transversales, empleado para describir la transferencia de materia a una malla única, fue entonces aplicado al lecho de mallas. En la fig. III-9 están representados los valores de $Sh_m/Sc_m^{1/3}$ vs Re_m para las soluciones A, BCL, L1 y L15 calculados en base a las expresiones de estos adimensionales obtenidos de acuerdo a dicho modelo y que figuran en el Capítulo II.

Se puede observar que los datos correspondientes a los diferentes lechos de mallas obtenidos tanto con las soluciones que no contienen CMC como con los fluidos que pertenecen al grupo de la ley de la potencia, se ubican sobre una línea. Esto indica que el modelo de flujo alrededor de cilindros describe adecuadamente la transferencia en lechos de mallas, probablemente debido a la elevada porosidad de esos lechos.

La correlación general que se obtiene es la siguiente:

$$Sh_m = 0,838 Sc^{0,33} Re_m^{0,37}$$

con una dispersión de 9,21 %.

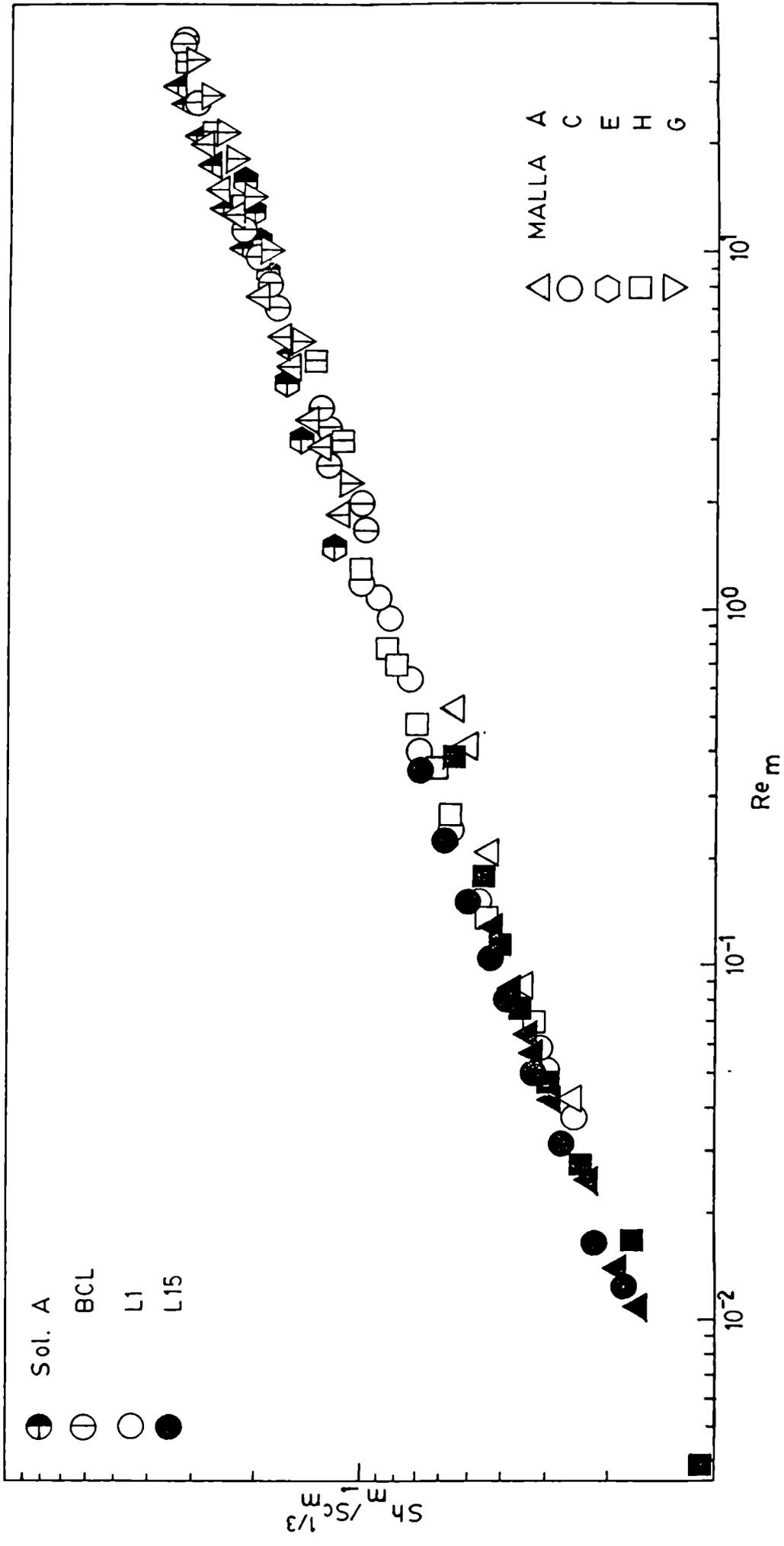


fig. III-9

Otra forma de tratar teóricamente los fenómenos que ocurren en lechos porosos involucra el modelo capilar que, según la literatura (Bird y col.) suele por lo general ser más exitoso. Por ello se trata de adaptar este modelo a los sistemas aquí estudiados, haciendo las consideraciones que se detallan a continuación.

El modelo capilar

Para el estudio de la pérdida de presión de fluidos Newtonianos a través de medios porosos se aplica comúnmente el modelo capilar que fue desarrollado por Kozeny y Carman (ver Happel p. 403). Este modelo considera al lecho relleno como un manojó de capilares tortuosos, cuya sección varía aleatoriamente a lo largo del lecho. Las suposiciones que se hacen son que el relleno es uniforme en todo el lecho y que el diámetro del relleno es pequeño en comparación con el diámetro de la columna que lo contiene. Se aplican los resultados de flujo en tubos rectos al conjunto de los tubos tortuosos.

La velocidad media del fluido en un capilar no cilíndrico de $R_{eq} = 2 R_H$ y longitud L es:

$$\bar{U} = \frac{R_H^2 \Delta P}{M_o \mu L} \quad (III-1)$$

que se convierte en la expresión de Hagen-Poiseuille si M_o vale 2.

Para aplicar el modelo capilar al lecho de mallas se hacen las siguientes hipótesis:

a) se toma como radio hidráulico:

///

$$R_H = \frac{\varepsilon}{\varphi}$$

considerando un lecho de partículas cilíndricas de diámetro d

$$\varphi = \frac{4}{d} (1 - \varepsilon)$$

y entonces:

$$R_H = \frac{d}{4} \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)}$$

b) se supone que el camino de una línea de corriente a lo largo de los poros es tortuoso y con una longitud promedio L_e , mayor que la longitud del lecho, L ; la relación que existe entre ambas se conoce como la tortuosidad, T . Se ha encontrado experimentalmente el valor:

$$T = \frac{L_e}{L} = \frac{25}{12} \quad (\text{III-2})$$

que es aceptado por muchos autores.

c) la velocidad media en los intersticios se relaciona con la velocidad superficial en la forma

$$\bar{U} = \frac{U}{\varepsilon} \frac{L_e}{L}$$

ya que según Carman, (ver Happel) el tiempo empleado por un elemento del fluido para pasar por un camino de longitud L_e es mayor, en una cantidad L_e/L , que si pasara directamente por uno de longitud L .

Con estas consideraciones la ecuación (III-1) se con-

///

vierte en

$$U = \frac{d^2 \epsilon^3 \Delta P}{16 M(1 - \epsilon)^2 \mu L} \quad (\text{III-3})$$

que es la ecuación de Blake-Kozeny. $M = M_0 \left(\frac{L_e}{L}\right)^2$ es la "constante de Kozeny", que es adimensional y es aproximadamente igual y constante para varios medios porosos según ha sido comprobado reiteradamente en forma experimental, pero también puede ser calculada teóricamente.

La permeabilidad

Una expresión semiempírica que también describe el comportamiento del flujo a través de un medio poroso, es la ley de Darcy

$$U = \frac{\mathcal{P} \Delta P}{\mu L} \quad (\text{III-4})$$

en la cual aparece la permeabilidad, que es una característica del medio poroso. Según Christopher y Middleman (1965), la permeabilidad es la misma para configuraciones de lecho idénticas, independientemente de las condiciones de flujo.

De la comparación de III-3 y III-4 surge

$$\mathcal{P} = \frac{d^2 \epsilon^3}{16 M(1 - \epsilon)^2} \quad (\text{III-5})$$

Como por otra parte

///

$$Q = \frac{U \mu L}{\Delta P}$$

el valor de la permeabilidad puede determinarse experimentalmente con un fluido Newtoniano, o sino calcularlo mediante (III-5) a partir de las características geométricas del lecho, siempre que se conozca M.

El valor de M, como ya se mencionó, puede ser obtenido teóricamente. Happel ha calculado dicho valor aplicando el modelo de la celda, el cual visualiza al medio poroso como un conjunto de celdas idénticas. Cada celda está constituida por una partícula y el fluido que la rodea, de tal manera que la porosidad de la celda sea igual a la porosidad del medio.

Se plantean las ecuaciones de movimiento las que se resuelven para las condiciones de contorno correspondientes y se obtiene una expresión para la velocidad media dentro de los poros. De la comparación de esa expresión con la Ley de Darcy, en la cual interviene la permeabilidad, puede calcularse la "constante de Kozeny" en función de la porosidad del lecho. Este desarrollo teórico ha sido hecho para el caso de flujo a través de lechos de esferas, flujo paralelo a cilindros y flujo perpendicular a cilindros.

Así, para el caso de flujo perpendicular a cilindros, de interés para el lecho de mallas aquí investigado, Happel (p. 399) obtuvo los siguientes valores de la constante M:

ξ	M
0,8	7,46
0,85	9,1
0,9	11,03

///

En base a estos datos y la ecuación (III-5) se obtuvieron los valores de la permeabilidad de los lechos de mallas ensayadas y que figuran en la Tabla VII.

La viscosidad efectiva

A partir del modelo capilar se obtiene una expresión general que puede ser resuelta para distintos modelos reológicos. En el presente trabajo se resuelve para la relación entre τ y $\dot{\gamma}$, conocida como ley de la potencia. Vinculando la ecuación resultante a la ley de Darcy se obtendrá una expresión para la viscosidad efectiva, y con ésta, grupos adimensionales para describir el comportamiento de un fluido no-Newtoniano en el lecho relleno.

Cuando un fluido cuyas propiedades reológicas son independientes del tiempo circula por un tubo, la relación entre esfuerzo de corte y el gradiente de velocidades está dada por:

$$\dot{\gamma} = - \frac{du}{dr} = f(\tau) \quad \text{(III-6)}$$

Por medio de un balance de fuerzas en una sección anular se obtiene

$$2 \tau r L = \pi r^2 \Delta P \quad \delta \quad \tau = \frac{r \Delta P}{2 L}$$

siendo en la pared del tubo

$$\tau_p = \frac{R \Delta P}{2 L} \quad y \quad \frac{\tau}{\tau_p} = \frac{r}{R} \quad \text{(III-7)}$$

///

si no hay deslizamiento en la pared $u(R) = 0$ y entonces de la (III-6) tenemos

$$u(r) = \int_r^R f(\tilde{\tau}) dr$$

y será

$$Q = \int_0^R 2 \pi r u(r) dr = \pi \int_0^R u(r) d(r^2)$$

integrando por partes

$$Q = \pi \left[r^2 u(r) - \int r^2 du(r) \right]_0^R$$

nuevamente siendo $u(R) = 0$

$$Q = -\pi \int_0^R r^2 du(r)$$

de (III-6) y (III-7) se obtiene

$$F(\tilde{\tau}_p) = \frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\tilde{\tau}_p^3} \int_0^{\tilde{\tau}_p} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (\text{III-8})$$

(para el caso de fluidos Newtonianos $f(\tilde{\tau}) = \frac{\tilde{\tau}}{\mu}$ y (III-8) conduce a la ecuación de Hagen-Poiseuille).

Para fluidos de la ley de la potencia $f(\tilde{\tau}) = \left(\frac{\tilde{\tau}}{K}\right)^{1/n}$ y en (III-8)

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\tilde{\tau}_p^3 K^{1/n}} \int_0^{\tilde{\tau}_p} \tau^{(2n+1)/n} d\tau$$

///

integrando

$$\frac{Q}{\tau R^3} = \left(\frac{n}{3n+1}\right) \left(\frac{\tau_p}{K}\right)^{1/n}$$

reemplazando

$$\bar{U} = R \left(\frac{n}{3n+1}\right) \left(\frac{\Delta P R}{2 L K}\right)^{1/n}$$

$$\bar{U} = \left(\frac{n}{3n+1}\right) \left(\frac{\Delta P}{2 L K}\right)^{1/n} R^{(1+\frac{1}{n})} \quad (\text{III-9})$$

Esta expresión, válida para un fluido de la ley de la potencia, es equivalente a la de Hagen-Poiseuille.

Si en (III-9) se hacen los reemplazos correspondientes a las hipótesis del modelo capilar, se obtiene la siguiente expresión

$$U = \left(\frac{n \xi}{3n+1}\right) \left(\frac{d \xi}{2(1-\xi)}\right)^{(1+\frac{1}{n})} \frac{L}{L_e} \left(\frac{6 \Delta P}{25 L K}\right)^{1/n} \quad (\text{III-10})$$

que es la ecuación de Blake-Kozeny modificada.

Análogamente la ley de Darcy y su expresión en función de la permeabilidad, conduce según Bird y col. (pag. 206), a una relación del tipo

$$U = \left(\frac{J}{\mu_{ef}}\right) \left(\frac{\Delta P}{L}\right)^{1/n} \quad (\text{III-11})$$

para el caso de fluidos no-Newtonianos.

///

Igualando (III-10) y (III-11)

$$U^n = \frac{\rho \Delta P}{\mu_{ef} L} = \left(\frac{n \varepsilon}{3n+1}\right)^n \left(\frac{d \varepsilon}{2(1-\varepsilon)}\right)^{n+1} \left(\frac{L}{L_e}\right)^n \frac{6 \Delta P}{25 L K}$$

y reemplazando d por la (III-5)

$$\frac{\rho}{\mu_{ef}} = \frac{1}{2K} \left(\frac{n \varepsilon}{3n+1}\right)^n \left(\frac{M \rho}{\varepsilon}\right)^{\frac{n+1}{2}}$$

Así tenemos

$$\mu_{ef} = \frac{2 K}{M^{\frac{2}{n+1}}} \left(3 + \frac{1}{n}\right)^n (\varepsilon \rho)^{\frac{1-n}{2}}$$

A partir de los resultados derivados de aplicar el modelo capilar y el concepto de permeabilidad del lecho, se definen entonces los grupos adimensionales que están involucrados en el proceso de transferencia de materia. El número de Reynolds generalizado resulta:

$$Re_n = \frac{\rho U^{2-n} d}{\mu_{ef}}$$

el número de Schmidt adaptado para flujo a través de lechos porosos:

$$Sc_n = \frac{\mu_{ef}}{\rho D} U^{n-1}$$

y el número de Sherwood:

///

$$Sh_n = \frac{k d}{\mathcal{D}}$$

los cuales se reducen a sus correspondientes para fluidos Newtonianos cuando $n = 1$.

Correlación de datos

Los datos experimentales llevados a la forma de Re_n y Sh_n se correlacionaron, fijando para el número de Schmidt el exponente 0,33 y proponiendo una relación:

$$Sh_n = a Sc_n^{0,33} Re_n^b$$

En la fig. III-10 se muestran los valores de $Sh_n/Sc_n^{0,33}$ representados vs Re_n en escala doble logarítmica.

Los datos experimentales caen sobre dos curvas separadas; los correspondientes a las soluciones A, BCL, L1 y L15 (grupo A') sobre una curva y los correspondientes a las soluciones RCL03, RCL075 y RCL12 (grupo B') sobre la otra.

Mediante la aplicación de una regresión lineal se obtuvieron los valores de la constante a y el exponente del número de Reynolds para el grupo A' de soluciones, resultando la siguiente correlación general:

$$Sh_n = 0,908 Sc_n^{0,33} Re_n^{0,34}$$

con una dispersión de 7,94%.

Como se hizo notar en el Capítulo II, la diferencia que existe entre ambos grupos de soluciones es la procedencia del espesante utilizado.

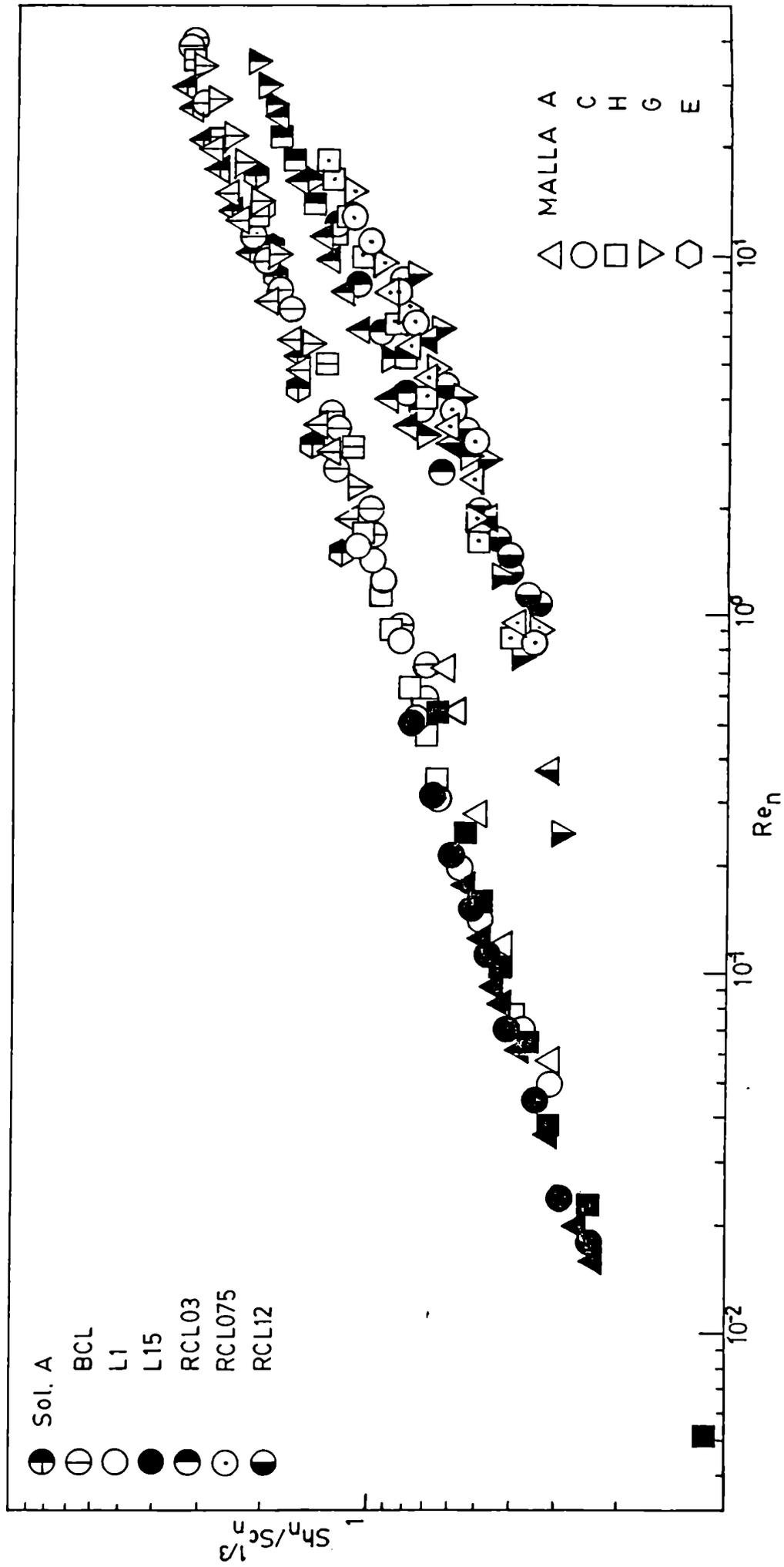


fig. III-10

Las soluciones que forman el grupo A', contienen CMC marca BDH y presentan comportamiento no-Newtoniano o son aquellas libres de espesante, y los resultados obtenidos con todas ellas correlacionan juntos. En cambio las soluciones pertenecientes al grupo B', preparadas con CMC marca ROSENCO, dan resultados que se apartan de los anteriores.

Con el fin de encontrar una explicación a dicha discrepancia se hizo un estudio comparativo de ambos grupos de soluciones.

La observación al microscopio de las mismas indicó que la CMC de BDH se disuelve completamente, en cambio en las soluciones de CMC de ROSENCO se encontró gran número de fibrillas y geles suspendidos, o sea se está en presencia de una suspensión; parte del polímero se halla disuelto y otra porción permanece suspendida en esa solución soporte.

Además, mediciones comparativas de viscosidad (a igual concentración de polímero), indican que la CMC de ROSENCO no confiere consistencia al fluido, no siendo adecuada como espesante.

Los resultados obtenidos con las soluciones del grupo B' se podrán interpretar con más claridad si se indaga sobre el comportamiento de las suspensiones:

Segre y Silberberg (1961), estudiando el flujo de suspensiones diluídas en régimen laminar en un tubo, observaron la formación de agregados a pesar de partir de una distribución inicial uniforme de partículas. En las cercanías de la entrada al tubo las partículas muestran una distribución parabólica y aguas abajo, después de haber recorrido una cierta distancia, se agrupan en una región anular.

También Langer y Werner (1981) encontraron que en el flujo de suspensiones por tubos se produce un efecto geométrico de redistribución de las partículas sólidas (efecto Sigma) en las cercanías de la pared debido a que ellas teóricamente pueden aproximarse sólo a una distancia de $d_p/2$ a la pared del tubo. En consecuencia gracias a las condiciones de flujo reinantes en dicha zona, se desarrolla una capa límite casi libre de sólidos con circulación de líquido soporte únicamente.

Es bien sabido que en el flujo de suspensiones en régimen laminar estacionario la presencia de las partículas modifica la transferencia de materia. Esta modificación puede tener origen en tres aportes distintos; el primero debido a la velocidad de deslizamiento entre partículas y fluido, el segundo debido a un movimiento transversal de las partículas y el tercero debido a la rotación de las mismas.

Bauckhage y col. (1980-1983-1983) han estudiado exhaustivamente este fenómeno y han podido detectar y medir esos aportes. El primero, debido al deslizamiento entre partículas y fluido, es despreciable cuando las densidades de sólido y fluido son parecidas. El segundo, ocasionado por el movimiento transversal de las partículas, de naturaleza no estacionaria, sólo se presenta en la zona de entrada al tubo donde tiene lugar la redistribución de aquellas debido al efecto Sigma y persiste hasta que las partículas se ubican en la posición radial de equilibrio. Los sólidos se mueven luego con velocidad axial constante y las partículas adquieren un movimiento rotatorio.

De esta forma se pone de manifiesto el tercero de los aportes mencionados, ya que esa rotación de las partículas in-

///

duce un aumento en la transferencia de materia, presente tanto en la "longitud de entrada de la suspensión", como aguas abajo de la misma.

En el caso de suspensiones concentradas ($C_s > 1\%$ en volumen) la ubicación de las partículas ya no puede ser descrito por el "radio de equilibrio", ya que debido a interacciones entre las partículas, las mismas se mueven dentro de una sección anular más o menos ancha, pero siempre se observa una zona libre de sólidos cerca de la pared del tubo. El aumento en la transferencia de materia respecto del flujo libre de sólidos es inversamente proporcional al cuadrado del ancho de dicha zona libre de sólidos; por lo tanto el aporte a la transferencia de materia por rotación de las partículas es tanto más efectivo cuanto más cerca de la pared se ubiquen las mismas.

Keller (1971) ya había observado y estudiado el aumento de la transferencia de materia por la rotación de las partículas en flujo Couette con las partículas "redistribuidas".

Los sistemas empleados en el presente trabajo para determinar los coeficientes de difusión en las soluciones (escorrimiento laminar en un tubo y flujo laminar en un disco rotatorio) se ajustan a los modelos que describen los autores citados. Por lo tanto es muy probable que, con las soluciones del grupo B', con partículas en suspensión, se desarrolle una capa de fluido libre de partículas en la cercanía de la pared y en consecuencia la difusividad se determina en presencia de ese fenómeno particular. En la Tabla VI se puede ver que las difusividades en las soluciones del grupo B' presentan valores más altos que la solución libre de polímero, mientras que las

///

soluciones L1 y L15 muestran la tendencia inversa; la diferencia en las tendencias puede deberse a la presencia de fibrillas en el primer caso, como lo indican los trabajos mencionados sobre el comportamiento de suspensiones.

Esos valores de difusividad se utilizaron para calcular el grupo adimensional $Sh_n/Sc_n^{1/3}$ arrojando resultados que no se alinean con los obtenidos para las soluciones del grupo A'.

La discrepancia en los resultados, puede deberse entonces a que las difusividades consideradas para el cálculo no son las que corresponden a las condiciones de flujo reinantes en el lecho de mallas. Estas no son conocidas, pero a causa de la geometría compleja y la tortuosidad del camino recorrido por el fluido, es difícil suponer que se favorezca la "redistribución" de partículas dentro del lecho, como ocurre en los otros sistemas utilizados para la determinación de D .

4. Conclusiones

Se determinaron los coeficientes de transferencia de materia en lechos de mallas, variando las características geométricas de las mismas.

La mayoría de los fluidos utilizados contienen CMC como espesante, que en algunos casos les confiere comportamiento no-Newtoniano.

El modelo de flujo alrededor de objetos sumergidos adaptado para el caso de fluidos no-Newtonianos aplicado al lecho de mallas condujo a resultados que se correlacionaron fijando el exponente del Sc en 0,33 con lo cual se obtuvo para el exponente del Re_m un valor de 0,37.

Mediante la aplicación del modelo capilar al lecho de mallas, adaptado para el caso de fluidos no-Newtonianos, se correlacionaron los datos experimentales fijando, igual que en el caso anterior, el exponente del Sc en 0,33 y obteniendo un valor 0,34 para el exponente del Re_n .

En ambos casos se cubrieron amplios rangos de valores tanto para el Sc como para el Re.

Debido a los inconvenientes surgidos en la determinación de la difusividad en un grupo de soluciones con partículas en suspensión, que crea incertidumbre en los valores de $Sh/Sc^{1/3}$ calculados, se decidió no correlacionar los datos correspondientes a dichas soluciones.

///

Conclusiones generales

- Se intentó usar PAA AP-30 como espesante de las soluciones empleadas en el estudio de la transferencia de materia en lechos de mallas, pero no fue posible a causa de las anomalías que se presentaron en la determinación de la difusividad, por lo cual se optó por usar CMC.

- Según la calidad de la CMC en algunos casos se han obtenido soluciones y en otros suspensiones que mostraron un comportamiento diferente. En el caso de las suspensiones, dicho comportamiento crea incertidumbre en las difusividades determinadas por lo cual los datos obtenidos con las suspensiones no se han correlacionado.

- Mediante la técnica electroquímica se determinaron los coeficientes de transferencia de materia, para sistemas de una malla y lechos formados por varias mallas, con fluidos no-Newtonianos y fluidos de viscosidad variable, circulando a distintas velocidades.

- Aplicando un modelo de flujo alrededor de objetos sumergidos se encontró que el diámetro de alambre es la longitud característica adecuada y se deducen los grupos adimensionales para correlacionar los datos experimentales.

Las correlaciones encontradas para una malla:

$$Sh_m = 0,770 Sc_m^{0,33} Re_m^{0,37} \quad 2 \times 10^{-3} < Re_m < 2$$

$$Sh_m = 0,674 Sc_m^{0,33} Re_m^{0,46} \quad 2 < Re_m < 45$$

se verifican en un amplio rango de Sc_m y Re_m

///

$$1288 < Sc_m < 1.320.000$$

$$2 \times 10^{-3} < Re_m < 45$$

para el lecho:

$$Sh_m = 0,838 Sc_m^{0,33} Re_m^{0,37}$$

$$4 \times 10^{-3} < Re_m < 40$$

$$1288 < Sc_m < 1.120.000$$

- Para el caso de lecho de mallas, mediante la aplicación del modelo capilar, se encontraron los adimensionales que permitieron correlacionar los datos experimentales de coeficientes de transferencia de materia para fluidos no-Newtonianos junto con los de comportamiento Newtoniano.

- Se encontró la correlación

$$Sh_n = 0,908 Sc_n^{0,33} Re_n^{0,34}$$

que vale en un extenso rango de Sc_n y Re_n

$$1288 < Sc_n < 351638$$

$$5 \times 10^{-3} < Re_n < 40$$

- Cabe resaltar que en este último tratamiento para los lechos de mallas se deduce una viscosidad efectiva cuya expresión refleja la complejidad geométrica y de flujo:

$$\mu_{ef} = \frac{2K}{M \frac{n+1}{2}} \left(3 + \frac{1}{n}\right)^n (\epsilon \rho)^{\frac{1-n}{2}}$$

M. Bot

Do/Is III

Tabla I

Parámetros reológicos de la solución de PAA AP-30

T(°C)	$K \times 10^2 \left(\frac{\text{din}}{\text{cm}^2} \frac{\text{s}^n}{\text{cm}^2} \right)$	n
36	11,5	0,34
32,5	12,7	0,36
28	13,22	0,36
23,5	13,59	0,36
20	15,29	0,33

Composición de la solución

10^{-2} M ferricianuro de K

10^{-2} M ferrocianuro de K

0,4 M carbonato de sodio

0,4 M bicarbonato de sodio

1% PAA AP-30

///

Tabla II

Composición de soluciones que contienen CMC

Sol	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	CMC %
BC	10 ⁻²	10 ⁻²	0,4	0,4	0
RC03	10 ⁻²	10 ⁻²	0,4	0,4	0,3
RC06	10 ⁻²	10 ⁻²	0,4	0,4	0,6
RC075	10 ⁻²	10 ⁻²	0,4	0,4	0,75
RC09	10 ⁻²	10 ⁻²	0,4	0,4	0,9
RC12	10 ⁻²	10 ⁻²	0,4	0,4	1,2

C₁ = concentración de ferricianuro de K (M)

C₂ = concentración de ferrocianuro de K (M)

C₃ = concentración de carbonato de sodio (M)

C₄ = concentración de bicarbonato de sodio (M)

///

Tabla III

Propiedades de soluciones que contienen CMC

Sol	$K \times 10^2 \left(\frac{\text{din s}^n}{\text{cm}^2} \right)$	n	$\mathcal{D} \times 10^6 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right)$	$\rho (\text{g/cm}^3)$	T(°C)	Sc
BC	1,167	1	6,07	1,060	25	1813
RC03	2,007	1	6,98	1,097	25	2621
RC06	3,712	1	7,66	1,100	25	4405
RC075	6,314	1	7,70	1,106	25	7414
RC09	11,67	1	8,46	1,108	25	12450
RC12	22,36	1	9,32	1,113	25	21555

///

Tabla IV

Composición de soluciones que contienen CMC

Sol	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	CMC %	C ₅
A	10 ⁻³	10 ⁻³	0	0	0	0,5
BCL	10 ⁻³	10 ⁻³	0,4	0,4	0	-
RCLO3	10 ⁻³	10 ⁻³	0,4	0,4	0,3 (R)	-
RCLO75	10 ⁻³	10 ⁻³	0,4	0,4	0,75 (R)	-
RCL12	10 ⁻³	10 ⁻³	0,4	0,4	1,2 (R)	-
L1	10 ⁻³	10 ⁻³	0,4	0,4	1 (BDH)	-
L15	10 ⁻³	10 ⁻³	0,4	0,4	1,5 (BDH)	-

C₁, C₂, C₃ y C₄ ver Tabla II

C₅ = concentración de hidróxido de sodio (M)

(R) = CMC Rosenco

(BDH) = CMC marca BDH

///

Tabla V
Parámetros reológicos de las soluciones L1 y L15

Sol	T(°C)	$K\left(\frac{\text{din s}^n}{\text{cm}^2}\right)$	n
L1	16,5	0,920	0,78
L1	18,5	0,781	0,80
L1	21	0,753	0,80
L1	24,5	0,618	0,81
L1	28,5	0,524	0,83
L15	18,75	3,23	0,70
L15	21,5	2,76	0,72
L15	23,5	2,32	0,73
L15	26	2,13	0,74
L15	30	1,64	0,76

///

Tabla VI

Propiedades de las soluciones que contienen CMC T = 25°C

Sol	$\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$	$\mu \text{ ó } K \times 10^2 \left(\frac{\text{din s}^n}{\text{cm}^2} \right)$	n	$\mathcal{D} \times 10^6 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right)$	Sc
A	1,02	0,989	1	7,53	1288
BCL	1,060	1,167	1	5,71 . 5,47 ..	1970
RCL03	1,060	1,74	1	5,53 . 5,30 ..	3033
RCL075	1,060	2,92	1	5,88 . 5,78 ..	4725
RCL12	1,065	5,21	1	6,34 . 6,09 ..	7874
L1	1,072	61	0,81	4,78	----
L15	1,076	220	0,74	4,24	----

- celda de flujo
- .. disco rotatorio

///

Tabla VII

Características geométricas de mallas

Malla	d (cm)	δ (cm)	D (cm)	ϵ	ψ (cm ⁻¹)	\mathcal{P} (cm ²)
A.	0,0715	0,1628	0,246	0,84	8,95	0,813x10 ⁻³
C	0,0800	0,1668	0,338	0,85	7,50	1,19x10 ⁻³
D	0,0384	0,0802	0,114	0,80	20,83	0,158x10 ⁻³
E	0,0380	0,0861	0,155	0,84	16,84	0,230x10 ⁻³
G	0,0996	0,1963	0,522	0,88	4,8	2,67x10 ⁻³
H	0,0898	0,1816	0,398	0,86	6,24	1,80x10 ⁻³

Notación

A	área de transferencia, cm^2
c	concentración del ión reactivo, mol/cm^3
c_o	concentración del ión reactivo en el seno de la solución, mol/cm^3
c_s	concentración de sólidos, % en peso
c_w	concentración del ión reactivo en la interfase de transferencia, mol/cm^3
d	diámetro de alambre, cm
d_t	diámetro del tubo, cm
d_p	diámetro de partícula, cm
D	separación entre alambres, cm
\mathcal{D}	difusividad del ión ferricianuro, cm^2/s
F	constante de Faraday, coul/mol
I	intensidad de corriente, A
I_1	intensidad de corriente límite, A
j_1	densidad de corriente límite, A/cm^2
k	coeficiente medio de transferencia de materia, cm/s
K	parámetro de la ley de la potencia (ec. I-1), $\text{dina s}^n/\text{cm}^2$
L	longitud del tubo, cm
L_e	longitud a través del camino tortuoso dentro del lecho, cm
m	constante en la ec. II-1
m'	constante en la ec. II-2
M_o	constante en la ec. III-1
M	constante en la ec. III-3
n	índice de flujo (ley de la potencia), ec. I-1
N	flujo molar, $\text{mol}/\text{cm}^2 \text{ s}$

///

ρ	permeabilidad, cm^2
Q	caudal, cm^3/s
r	radio, cm
R	radio del tubo, cm
R_{eq}	radio equivalente, cm
R_{H}	radio hidráulico, cm
$\text{Re}_m =$	$\frac{\rho U^{2-n} d^n}{K}$
$\text{Re}_n =$	$\frac{\rho U^{2-n} d}{\mu_{\text{ef}}}$
S	sección de la columna, cm^2
$\text{Sc}_m =$	$\frac{U d}{\mathcal{D} \text{Re}_m^{2/n+1}}$
$\text{Sc}_n =$	$\frac{\mu_{\text{ef}} U^{n-1}}{\mathcal{D} \rho}$
$\text{Sh}_m = \text{Sh}_n =$	$\frac{k d}{\mathcal{D}}$
T	tortuosidad, ec. III-2
u	velocidad puntual, cm/s
U	velocidad superficial, cm/s
U_m	velocidad media en el tubo, cm/s
\bar{U}	velocidad media en el capilar e intersticios, cm/s
W	velocidad de rotación, s^{-1}
x	exponente del número de Reynolds en la ec. II-1
x'	exponente del número de Reynolds en la ec. II-2
Z	número de electrones intercambiados por el ión

Letras griegas

$\dot{\gamma}$	gradiente de velocidades, s^{-1}
----------------	---

///

δ	espesor de malla, cm
ΔP	pérdida de carga, dina/cm ²
ϵ	porosidad
ψ	área específica, cm ⁻¹
μ	viscosidad dinámica, g/cm s
μ_{ef}	viscosidad efectiva, din s ⁿ /cm ⁿ⁺¹
ν	viscosidad cinemática, cm ² /s
ρ	densidad, g/cm ³
τ	esfuerzo de corte, dina/cm ²
τ_p	esfuerzo de corte en la pared, dina/cm ²

Bibliografía

- Arvía, A.J., Bazán, J.C., Carrozza, J.S. Electrochim. Acta 13, 81 (1968).
- Astarita, G. I. and E.C. Fund. 4, 236 (1965).
- Astarita, G. I. and E.C. Fund. 5, 14 (1966).
- Bauckhage, K., Obermayer, A. Chem. Ing. Tech. 52, 667 (1980).
- Bauckhage, K., Haase, B. Chem. Ing. Tech. 55, 66 (1983).
- Bauckhage, K. Haase, B. Schreckenber, P. Chem. Ing. Tech. 55, 576 (1983).
- Blass, E. Chem. Ing. Tech. 36, 747 (1964).
- Bird, B., Stewart, W., Lightfoot, E. Transport Phenomena John Willy and Sons, Inc. (1962).
- Christopher, R. Middleman, S. I. and E.C. Fund. 4, 422 (1965).
- Clough, S.B., Read, H.E., Metzner, A.B., Behn, V.C. AIChE J. 8, 346 (1962).
- Dim, A., Gardner, G.R., Ponter, A.B., Wood, T. J. of Chem. Eng. of Japan 4, 92 (1971).

///

- Greif, R., Cornet, I., Kappesser, R. Int. J. Heat Mass Transfer 15, 593 (1972).
- Hansford, G., Litt, M. Chem. Eng. Sci. 23, 849 (1968).
- Happel, J., Brenner, H. Low Reynolds Number Hydrodynamics. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, N.J. (1965).
- Hubbard, D., Williams, F., Heinrich, G. Proceedings of the VIII th International Congress on Rheology (1980).
- Kawase, Y., Ulbrecht, J.J. Electrochim Acta 28 (5) 643 (1983).
- Kim, H.W., Jeng, D.R., De Witt, K.J. Int. J. Heat Mass Transfer 26, 245 (1983).
- Knudsen, J.G. and Katz, D.L. Fluid Dynamics and Heat Transfer, Mc Graw Hill Book Co., N.Y. (1958).
- Kumar, S., Upadhyay, S.N. Ind. Eng. Chem. Fund. 20. 186 (1981).
- Lal, P., Mishra, P., Upadhyay, S.N. Letters in Heat and Mass Transfer 7, 65 (1980).
- Langer, G., Werner, U. Universität Dortmund, Comunicación privada (1980).
- Lévêque, M.A. Ann Mines Mem. 13 (12) (1928).

///

- Levich, V. Physicochemical Hydrodynamics, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, N.J. (1962).
- Mashelkar, R.A., Soylu, M.A. Chem. Eng. Sci. 29, 1089 (1974).
- Mashelkar, R.A., Soylu, M.A. J. of Applied Polymer Science 27, 697 (1982).
- Metzner, A.B. Nature 208, 267 (1965).
- Paul, D.R. I. and E.C. Fund. 6, 217 (1967).
- Pérez, J.F., Sandall, O.C. AIChE J. 19, 1073 (1973).
- Quinn, J.A., Blair, L.M. Nature 214, 907 (1967).
- Ross, T.K., Wragg, A.A. Electrochim. Acta 10, 1093 (1965).
- Segré, G., Silberberg, A. Nature 189, 209 (1961).
- Tonini, R.D., Remorino, M.R., Brea, F.M. Electrochim. Acta 23, 699 (1978).
- Tonini, R.D., Böhm, U., Brea, F.M. The Chem. Eng. J. 22, 51 (1981).
- Wasan, D.T., Lynch, M.A., Chad, K.J., Srinivasan, N. AIChE J. 18, 928 (1972).