

01183

2 ej 1

**ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DEL MATERIAL EN SUSPENSION
DENTRO DE UN EMBALSE.**

JESUS GRACIA SANCHEZ

TESIS DOCTORAL

**Presentada a la división de estudios de
Posgrado de la
FACULTAD DE INGENIERIA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
como requisito para obtener
el grado de**

**DOCTOR EN INGENIERIA
(HIDRAULICA)**

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F., febrero de 1988

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

Resumen

- 1.- INTRODUCCION**
- 2.- LA SEDIMENTACION EN EMBALSES Y SU CUANTIFICACION**
- 3.- DISEÑO DE EXPERIMENTOS**
- 4.- CARACTERISTICAS DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL, EQUIPO Y
RUTINA DE ENSAYOS**
- 5.- RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION**
- 6.- PROPOSICION TEORICA DEL PROBLEMA**
- 7.- SIMULACIONES NUMERICAS**
- 8.- LOS EMBALSES REALES Y EL DISPOSITIVO DE EXPERIMENTACION**
- 9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Reconocimientos

BIBLIOGRAFIA

Apéndice A (Parámetros principales en las pruebas realizadas)

Apéndice B (Información adicional)

Apéndice C (Fotografías)

Apéndice D (Desarrollo de la ecuación de continuidad)

Apéndice E (Datos y mediciones de las pruebas realizadas)

RESUMEN

La pérdida de capacidad de almacenamiento de los embalses es un problema que cada vez toma mayor importancia, dadas las crecientes necesidades de disponer de agua para generación de electricidad, riego, o agua potable. Se sabe que en muchos vasos el material sólido, más fino, que generalmente viaja en suspensión es, por su gran cantidad, la principal causa del problema. Sin embargo, los trabajos de investigación realizados a la fecha sobre el tema son escasos y la información de campo lo es aún más.

En este trabajo, se presentan los resultados de una investigación de carácter principalmente experimental, para determinar el comportamiento del material en suspensión dentro de un embalse. Se empleó en la experimentación un canal de pendiente variable cerrado en un extremo para simular el embalse, y se introdujo por el otro extremo una mezcla de agua-sedimento simulando el aporte de una corriente (río) al vaso. Se realizaron 124 pruebas, en las cuales se emplearon diferentes pendientes, gastos, concentraciones, estratificación de temperaturas, sección longitudinal del canal y se determinó la evolución del sedimento a través de la medición de longitudes de avance, tirantes, concentraciones y temperaturas. Se realizó el análisis de la información obtenida empleando técnicas estadísticas, números adimensionales y finalmente se propuso una interpretación del fenómeno apoyada en las observaciones realizadas y un modelo matemático para simulación del comportamiento del material en suspensión.

1.- INTRODUCCION

Uno de los principales problemas que afectan a los embalses es la pérdida de capacidad de almacenamiento, debida al depósito de sedimento en su interior. Si bien es cierto que como parte del diseño de embalses, está el disponer de un volumen para almacenar dichos azolves, frecuentemente éste es rápidamente rebasado, con la consecuente pérdida de volumen útil. En otros casos, aunque el volumen reservado para azolves no haya sido sobrepasado, la velocidad con que se pierde, hace prever que el embalse perderá capacidad de almacenamiento antes de lo planeado, con la consiguiente disminución de la disponibilidad de agua. En algunos casos extremos el embalse puede ser inutilizado totalmente. Una técnica importante para evitar la sedimentación de embalses, es controlar el aporte de sedimentos en las cuencas. Sin embargo, si se considera que los costos para evitar la erosión de cuencas son elevados y con resultados a largo plazo,

y que también lo son los costos de extracción del material depositado, entonces se entenderá porqué en muchas ocasiones es mejor construir un nuevo embalse que rehabilitar el dañado, lo cual es difícil, pues además de las altas inversiones, cada vez son mas escasos los sitios donde es posible contruir un nuevo embalse.

En la referencia 10 se indica que del análisis de algunas presas mexicanas, se ha encontrado que en el 70% de los casos han perdido su capacidad de azolve en periodos menores de 16 años, y que en el 40%, se ha reducido en más del 20% la capacidad útil. Dos datos (ref 13) referentes a los E.U., sintetizan claramente la magnitud del problema de sedimentación. Uno es que anualmente se pierden 50 millones de dólares por los daños causados por la sedimentación de embalses y el otro que aproximadamente 1200 millones de metros cúbicos de sedimento se depositan en los embalses cada año.

En cuanto a los principales criterios de cálculo, estos pueden dividirse en empíricos y analíticos. Los primeros en algunos casos no son suficientemente precisos y los segundos aún se encuentran en proceso de formulación y prueba. Una discusión completa sobre estos criterios se presentan en la referencia 10.

El trabajo aquí desarrollado puede considerarse entre los

criterios analíticos. En el se pretende estudiar, a través de un trabajo experimental, el comportamiento de material que viaja en suspensión dentro de un embalse y que constituye, en muchos casos, el principal mecanismo de transporte y depósito de la mayor parte del material sólido que se almacena en el fondo de los vasos.

Los objetivos que se pretenden alcanzar son los siguientes.

- a) Proponer una teoría que explique el movimiento del sedimento en suspensión dentro de un embalse.
- b) Proponer un procedimiento de cálculo, para cuantificar el movimiento y el depósito del sedimento en suspensión a lo largo de un vaso.
- c) Comprobar la validez del criterio propuesto, empleando los datos y resultados de un estudio experimental realizado para tal fin.
- d) Proponer la metodología de aplicación a embalses reales.

La presentación de la investigación realizada en este trabajo, se hace de la siguiente manera.

Cap. 1. Se hace una introducción, cuyo principal fin es informar al lector sobre la importancia del tema y la nece-

idad de estudiarlo.

Cap. 2. Se presenta una descripción general del movimiento del material en suspensión, y se propone una metodología general para abordar el problema de sedimentación en embalses.

Cap. 3. Se plantean los experimentos a realizar y se justifica el diseño experimental empleado.

Cap. 4. Se describen las características del dispositivo físico empleado en la experimentación, el equipo empleado y el procedimiento seguido en las pruebas.

Cap. 5. Se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el dispositivo experimental, los análisis estadísticos y de números adimensionales. También se incluyen los comentarios generales de la evolución del fenómeno en cada etapa de pruebas.

Cap. 6. Se propone una interpretación del fenómeno y una teoría general que permite cuantificar la evolución del sedimento.

Cap. 7. Se presentan los resultados obtenidos al aplicar la teoría propuesta, empleando los datos de las pruebas experimentales.

Cap. 8 Se presenta y discute la aplicación la aplicación del procedimiento de cálculo propuesto, al caso de embalses reales.

Cap. 9 Se presentan las conclusiones más relevantes del trabajo realizado, y se indican los aspectos que convendría continuar desarrollando.

Adicionalmente, se incluye la bibliografía empleada y apéndices que se considera podrían complementar la información al lector.

2.-LA SEDIMENTACION DE EMBALSES Y SU CUANTIFICACION

Al penetrar una corriente (río) en un embalse, el material sólido que transporta es depositado en parte a la entrada del vaso, debido a la disminución de la velocidad, que a su vez es causado por el incremento del tirante y la ampliación de la sección transversal, mientras que el material mas fino penetra en el vaso ya sea formando una corriente de densidad o como una turbidez parcial o total en el embalse (fig 2.1).

El material grueso que es depositado a la entrada del vaso forma un delta, el cual tenderá a avanzar hacia el interior, según las características de las avenidas y la fluctuación de los niveles. En general, la formación del delta tiene importancia en cuanto al volumen que ocupa dentro del vaso, pero es más relevante en cuanto a los efectos que puede producir aguas arriba, ya que el remanso que ocasiona puede inundar zonas que normalmente no eran afectadas por la

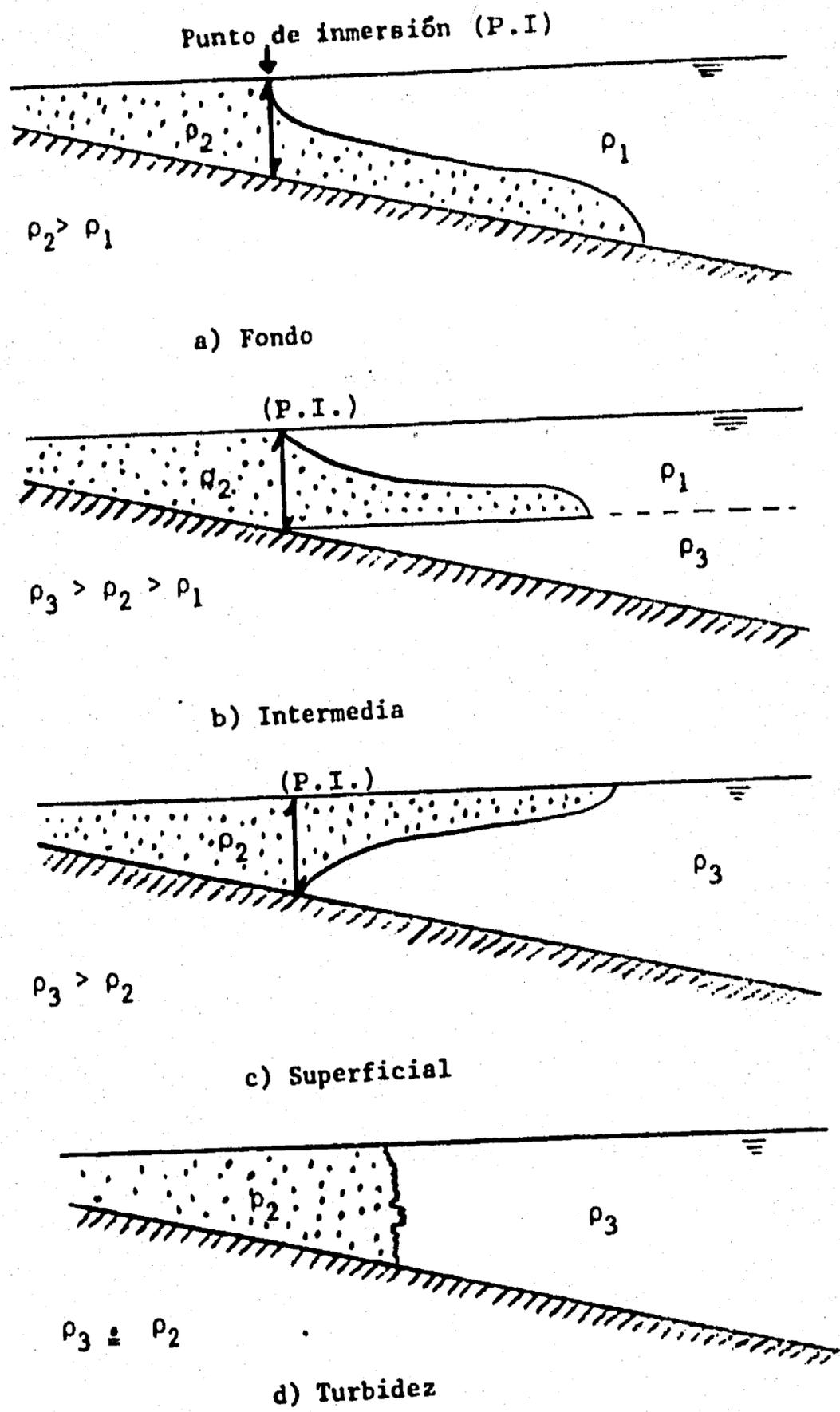


Fig 2.1 Movimiento del sedimento en suspensión dentro de un embalse.

corriente. Sin embargo, existen casos en que, debido a las características propias del embalse, el material grueso es muy importante por su cantidad, por lo cual el delta adquiere una gran importancia y entonces se requiere de una mayor atención al respecto (ref 18). En especial, cuando el delta ocupa prácticamente todo el vaso se ponen en peligro las instalaciones de la cortina susceptibles de ser obstruidas o dañadas (compuertas, turbinas, conductos, etc).

Aproximadamente en el sitio donde se presenta el delta, se forma también una zona denominada de inmersión, en la cual ocurre el mezclado del agua entrante cargada de sedimento con la almacenada, dando origen a las corrientes de densidad, las cuales generalmente viajan por el fondo del embalse. Este fenómeno está aún en proceso de estudio, ya que por su complejidad no existen criterios generales para representar su comportamiento. Las corrientes de densidad no solo pueden viajar por el fondo, pues también lo hacen por alguna zona intermedia del embalse o bien por su superficie; esto dependerá primordialmente de la densidad de la corriente y de la estratificación de temperaturas del agua almacenada (fig 2.1). Como se puede intuir fácilmente, las corrientes de densidad constituyen uno de los principales mecanismos de transporte y por lo tanto de depósito del material sólido dentro del vaso. Es más, en algunos casos son una esperanza prometedora para aliviar el problema de sedimentación, ya que un manejo adecuado de ellas

permitiría extraer material sólido por alguna de las obras de desfogue.

Cuando no se forman las corrientes de densidad, se genera en el vaso una turbidez que avanza ocupando todo el vaso, esto ocurre generalmente cuando las concentraciones de entrada no son muy altas. La dinámica de la turbidez dependerá de otros fenómenos, diferentes a los que producen el movimiento de una corriente de densidad (refs 1, 9).

El material que se deposita en el fondo del vaso estará sujeto a una consolidación con el paso del tiempo. Este efecto se acentúa cuando por fuertes descensos del nivel del agua, el material del vaso se ve sujeto a un secado y humedecimiento alternado, esto, aunado al peso propio induce dos problemas importantes, uno, el cambio del volumen depositado y el otro la dificultad de remover este sedimento altamente consolidado.

Por último, cabe señalar que el problema de sedimentación es consecuencia de otro igualmente importante, que es la erosión de suelos en las cuencas, de tal manera que en la medida en que se resuelva dicho problema, se aliviará también el problema de la sedimentación en embalses. Por desgracia, resolver el problema de erosión es costoso y a largo plazo, por lo cual el ingeniero se ve en la necesidad de disponer de herramientas que le permitan desde un punto

de vista técnico-económico, determinar en cada caso la solución mas propia. A continuación se propone una metodología que intenta servir de guía para tratar los problemas de sedimentación en embalses, la cual además permitirá al final de este capítulo, determinar la aplicabilidad de los resultados de este trabajo.

2.1 METODO DE ANALISIS EN LOS PROBLEMAS DE SEDIMENTACION

1) Determinación del aporte de sedimento. Para conocer la cantidad de sedimento que llegará a un embalse, se pueden hacer mediciones directas en campo (refs. 3, 31) y/o utilizar algún criterio de predicción como la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo (FUPS) (ref 26). Esta información permite obtener una primera aproximación de la magnitud del problema, pues indicará la capacidad que es necesario reservar para azolve en el vaso. Si el embalse ya se encuentra funcionando, las batimetrías también indicarán el aporte de sedimento.

2) Eficiencia de atrape. La cantidad de material sólido que será retenida por el embalse, se puede obtener por medio de los criterios empíricos existentes (ref 6). Este cálculo permitirá corregir la capacidad de azolve del inciso anterior.

3) Análisis del material sólido. Es necesario determinar

las características físico-químicas del material transportado, pues ellas condicionarán su comportamiento dentro del embalse. En especial es necesario conocer la cantidad de material grueso susceptible de ser depositado a la entrada del vaso (delta), y del material fino que viajará en suspensión. Esta información se puede obtener de las curvas granulométricas y de muestras de concentración de sedimentos en la corriente. Evidentemente, en éste cálculo también se requiere del estudio hidrológico del vaso (avenidas). En esta situación es posible definir cuál de los dos materiales será el principal problema dentro del vaso en cuanto a la pérdida de capacidad se refiere.

4) Ubicación del sedimento. Para conocer la distribución del material sólido en el fondo en el transcurso del tiempo, se pueden emplear los métodos empíricos, tales como el área-reducción, área-incremento, trigonométrico, etc. (ref 7); los cuales no requieren de mucha información y son aplicables cualesquiera que sean las características del sedimento y del embalse. Sin embargo, conviene señalar que los resultados obtenidos con estos métodos, deben tomarse con reserva ya que no siempre son confiables (ref 7).

5) Determinación del delta. Para obtener una primera aproximación de la forma del delta, se pueden emplear también métodos empíricos (ref 13). Sin embargo, cuando se sabe que el delta constituirá una parte importante del pro-

blema de sedimentación, es recomendable un estudio más detallado sobre este aspecto. Dicho estudio puede realizarse a través de un modelo matemático de simulación (v.g. ref 11). Un factor muy importante que debe tomarse en cuenta en esta etapa es la operación del vaso, o bien la posible fluctuación de niveles durante las avenidas. En esta etapa, si se considera necesario, sería conveniente revisar el efecto que causaría aguas arriba la presencia del delta.

6) Corrientes de densidad. Cuando se detecta que el material fino será el principal aporte de sedimento, entonces es conveniente realizar un estudio sobre la posibilidad de que se formen corrientes de densidad, esto permitirá ajustar y revisar los resultados obtenidos tanto en la ubicación del sedimento (inciso. 4), como en la determinación de la eficiencia de atrape (inciso. 2). Como antes se indicó, las corrientes de densidad no son un problema suficientemente estudiado, pero las referencias 2, 9, 14, 16, 21 y 23 podrán ayudar al lector en el estudio de este aspecto. Una alternativa muy importante en este caso es el empleo de modelos físicos para realizar simulaciones. Para este análisis, es necesario disponer, además de los datos del material en suspensión, de los hidrogramas de entrada al vaso y los cálculos o datos de la posible estratificación de temperaturas del agua embalsada.

7) Consolidación. Se determinará el grado de consolidación y por consiguiente el volumen real que ocuparán los sedimentos, para ello se pueden emplear los criterios empíricos correspondientes (ref 30). Aquí es necesario disponer de la información del volumen depositado, zonas de depósito, características físico-químicas del sedimento y las políticas de operación del vaso, pues ellas condicionarán la consolidación del sedimento.

8) Técnicas de desazolve. Según las características del material depositado y de su volumen (cantidad), se determinarán las técnicas de extracción de sedimento más adecuadas, (refs 22 y 29) así como la frecuencia de su empleo. En esta etapa pueden ser muy útiles los modelos físicos, pues permiten determinar la eficiencia de las estructuras de descarga de sedimento, así como la posibilidad de proyectar obras dentro del vaso, para encauzar a las corrientes.

9) Evaluación económica. En cada problema de sedimentación en embalses, habrá diferentes soluciones técnicamente posibles, pero que requieren de un análisis económico (ref 10) para decidir la mas conveniente. Por ejemplo, pueden existir en algún caso las siguientes alternativas: a) realización de obras en la cuenca para controlar el aporte de material sólido, b) dragado del sedimento dentro del vaso, c) construcción de represas aguas arriba del embalse y d) prever una gran capacidad para azolve en la presa. El

análisis económico permitirá determinar cuáles son las alternativas más convenientes. Nótese que dicho análisis no se restringe a embalses nuevos, sino también a los ya construidos que presentan problemas de azolve.

10) Estudios adicionales y mediciones. El proyectista deberá tener en mente que el problema de sedimentación no está asociado solamente a la pérdida de capacidad, sino que también puede inducir otros problemas importantes que deberán tomarse en consideración, tales como alteración de la calidad del agua potable, daños a la fauna del vaso, afectaciones aguas abajo, etc. Es recomendable también planear programas de mantenimiento en el embalse en cuanto al problema de sedimentación, los cuales deberán incluir el aforo de las corrientes entrantes al vaso y muestreos de sedimento, con lo cual se podrá realizar un seguimiento del problema.

Como se ha podido observar en el método propuesto anteriormente, el estudio del problema de sedimentación es complejo y tiene múltiples facetas. En especial, de lo indicado en el inciso 6, se puede inferir fácilmente la necesidad de estudiar el comportamiento del material en suspensión, ya que aún es un área donde no existe la infraestructura teórica suficiente para realizar cálculos confiables. Es por ello que este trabajo está dedicado a investigar tal comportamiento. Dada la carencia de información de campo y

de laboratorio, la gran cantidad de parámetros involucrados, la complejidad de las ecuaciones generales y el desconocimiento de relaciones para el cálculo en algunos aspectos del fenómeno, se ha considerado adecuado abordarlo a través de un estudio experimental. Dicho estudio permitirá, además de observar y cuantificar el fenómeno, proponer relaciones que permitan explicar su comportamiento y aplicar los resultados a casos reales.

3.-DISEÑO DE EXPERIMENTOS

La forma de los embalses es muy variada; sin embargo, si se piensa que la mayor parte de ellos son cauces cavados por los ríos, es posible aceptar que predomina la dimensión longitudinal sobre la transversal, por lo tanto, la semejanza con un canal con agua almacenada es aceptable para una gran cantidad de casos. Esta consideración implica la idea de bidimensionalidad, por lo cual se estima que el trabajo aquí presentado tiene aplicación a casos donde esta suposición sea aceptable (p.e. vasos de forma algargada o encañonada).

De la descripción hecha en el capítulo anterior, se puede aceptar que las principales variables que intervienen en el fenómeno y que convendría analizar en un estudio experimental serían las siguientes:

a) Gasto de entrada

- b) Concentración del material en suspensión que entra al embalse
- c) Pendiente del fondo
- d) Tipo de material en suspensión (granulometría)
- e) Estratificación de temperaturas del agua en el embalse y
- f) Curvas horizontales en el cauce

Evidentemente existen otros factores que también pueden ser importantes en el comportamiento del sedimento dentro del embalse, tales como características de las avenidas, distribución de la concentración en un hidrograma, efecto de las obras de descarga de la cortina, erosión del material del fondo del embalse, y el efecto del delta en la formación de las corrientes de densidad, entre otras. Sin embargo, se ha considerado que por ahora es suficiente con entender la importancia e interrelación de los factores antes señalados como para agregar estos últimos, los cuales, en principio, se suponen de segundo orden de importancia si se considera el problema global.

La experimentación a realizar se dividió en cinco etapas, las cuales fueron planteadas de la siguiente manera.

Etapa I. El objetivo en esta etapa fue determinar el comportamiento del material en suspensión en embalses de pendiente alta, no estratificados, empleando dos tipos de material en suspensión y para tres posibles gastos de entrada.

Con estas condiciones, se trata de representar el comportamiento del sedimento cuando la diferencia de densidades sólo es debida a la presencia del sedimento.

Las pendientes seleccionadas fueron .02, .04 y .06. La primera fué escogida en función de las limitaciones del dispositivo empleado, ya que pendientes más bajas acarrearán problemas en la medición, pues los tirantes son muy pequeños y las longitudes muy grandes. La más alta (.06) se escogió como límite superior de posibles casos reales y la intermedia porque es el promedio de los dos extremos.

Los materiales empleados fueron "caolín" y "ceniza", cuyas principales características se presentan en el apéndice B. Estos materiales se seleccionaron en función de la información reportada en la literatura (ref 13 y 19), donde se señala que el material en suspensión que no se deposita en la zona de entrada al vaso y que constituye a las corrientes de densidad o turbidez, tiene un diámetro medio menor de .02mm.

Las concentraciones empleadas fueron de 5 y 10 gr/lt, sabiendo que son concentraciones representativas de los prototipos.

Los gastos empleados fueron de 1, 1/2 y 1/4 lt/min, elegidos acordes con el volumen almacenado en el dispositivo

experimental, para representar avenidas probables. En todos los casos el volumen total de agua introducido fué el mismo (1 lt).

La combinación de las tres pendientes, tres gastos, dos concentraciones y dos tipos de sedimento en suspensión indican el total de pruebas a realizar (36) en esta etapa.

Las mediciones realizadas en cada prueba fueron la longitud que avanzó el sedimento en el tiempo, y los tirantes y concentraciones promedio. Las características del dispositivo experimental del equipo de medición y la rutina de trabajo durante los ensayos se indican en el capítulo 4.

Etapa II. A la luz de los resultados obtenidos en la primera etapa, se plantearon 12 pruebas para determinar la importancia de la estratificación de las temperaturas. El punto de partida fué considerar que corrientes con concentraciones mayores de 3 gr/l, tendrían necesariamente que viajar por el fondo del embalse, con lo cual la estratificación de temperaturas no tendría ninguna relevancia, es decir, si un embalse tiene agua fría (por ejemplo 5°C) la densidad del agua aumenta en 3gr/l, por lo cual cualquier corriente de entrada que tenga una densidad mayor o igual, muy probablemente viajará por el fondo y dicho comportamiento ya se conoce de la etapa anterior. Por esta razón se consideró conveniente probar concentraciones de sedimento a la entrada

de 2, 1 y 1/2 gr/l ($t=20^{\circ}\text{C}$), y probar dos distribuciones de temperaturas en el agua embalsada, una que fuera de 5°C constante en todo el estrato, y otra que variara de 20°C en la superficie a 5°C en el fondo. En otras palabras, en el primer caso se tendría una corriente entrante "caliente", con cargas bajas de sedimento, a un embalse de agua fría y el otro correspondería a una estratificación de temperaturas ($5-20^{\circ}\text{C}$). En ambos casos se emplearon gastos constantes de 1/4 y 1 l/min y un volumen constante de 1 lt.

La justificación de emplear agua fría (5°C , sin estratificación) radica en el hecho de que en muchos embalses, la variación de temperaturas ocurre en una capa tan delgada (v.g. 10 m) comparada con la profundidad total del embalse (v.g. 90m) que es despreciable. Emplear temperaturas menores de cinco grados Cent., no tiene mayor relevancia pues la variación de la densidad en ese rango ya no es significativa, pues prácticamente es constante. Simular temperaturas menores de cero grados Cent. no concuerdan con el comportamiento de un embalse, pues esta condición sería probable sólo en la capa congelada (muy pequeña) de la superficie.

El emplear una estratificación de 20°C en la superficie a 5°C en el fondo, no necesita mayor justificación pues es el caso más común en los vasos. Evidentemente que no en todos los vasos se presenta esta misma estratificación, es decir, pueden existir casos donde la temperatura de fondo fuera de

10°C y en la superficie de 30°C, o bien cualquier otra combinación, ello dependerá de cada embalse en particular; sin embargo desde el punto de vista del material en suspensión, existe una condición extrema, que es importante de analizar cuando la estratificación es muy acentuada, es decir, la temperatura superficial es alta y la del fondo baja y además esto ocurre en estratos de espesor importante. Nótese que en la medida en que la diferencia de temperaturas no fuera tan acentuada, la densidad del agua almacenada será prácticamente constante y en tal caso los resultados obtenidos en la primera etapa serían aplicables.

Una razón adicional para la elección de 20°C como temperatura en el estrato superior, es de orden práctico, ya que la temperatura ambiente promedio durante la realización de las pruebas fue de 18°C, lo cual implica que temperaturas más altas que ésta, ocasionan importantes pérdidas de calor al medio ambiente durante cada prueba, de tal manera que no sería posible determinar fácilmente si el cambio de temperatura en el agua embalsada se debe al fenómeno estudiado o al intercambio de calor con el medio ambiente.

Una última consideración importante en cuanto a las estratificaciones de temperaturas observadas en el laboratorio es la siguiente. Con referencia a la fig 3.1, supóngase que se tiene un embalse profundo con agua fría (v.g 5°C) y no existe estratificación, es decir la temperatura es cons-

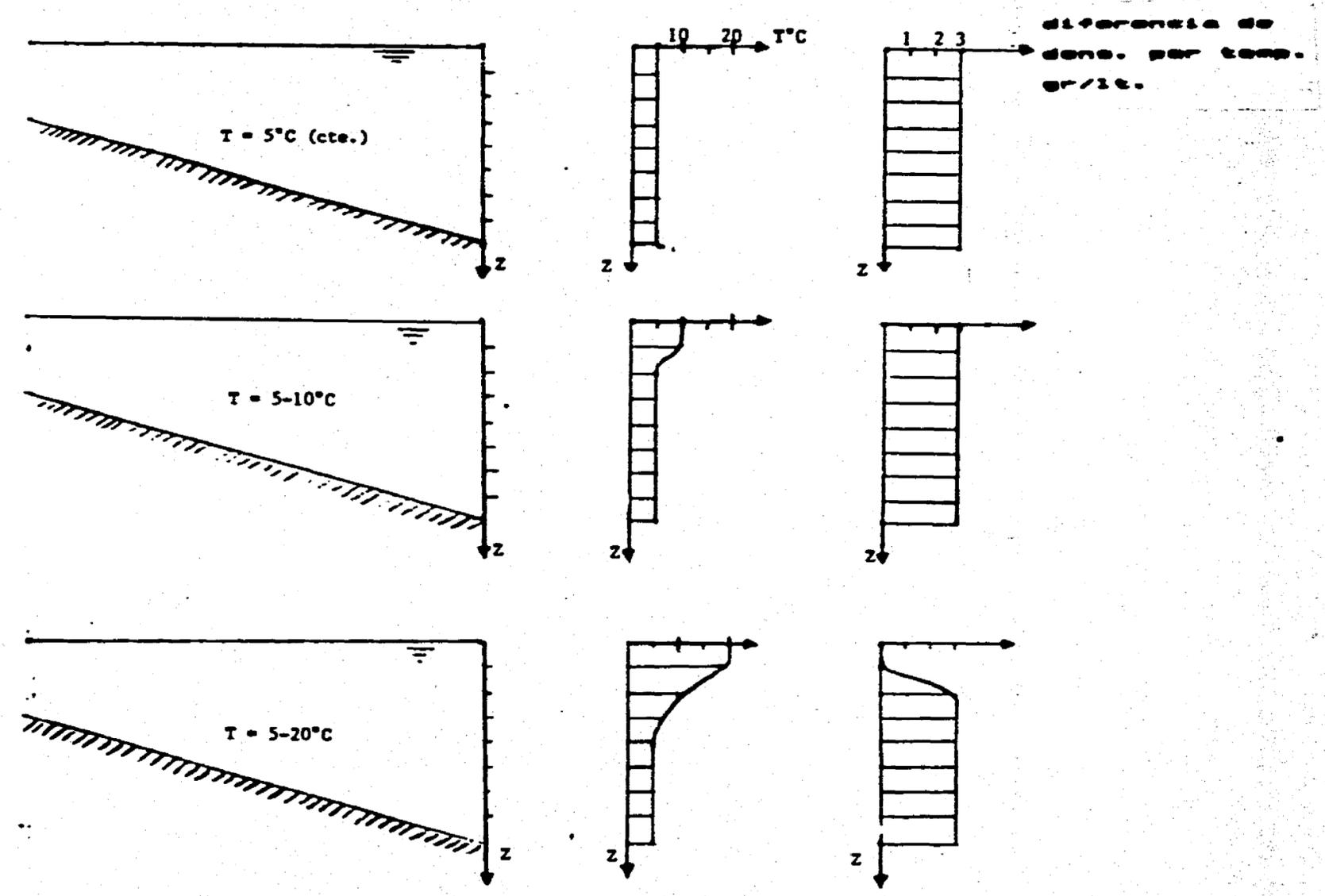


Fig 3.1 Distribución de temperaturas y diferencias de densidad por temperatura.

tante. Al empezar a calentar la superficie existe un gradiente térmico de migración de calor hacia abajo, pero si se acepta que el calentamiento de la superficie se debe a las condiciones atmosféricas (principalmente a los rayos solares), existirá en el transcurso de los días un estado de equilibrio que se manifestará como un gradiente térmico estable. Esto implica que para que exista una temperatura alta en la superficie (v.g. 20°C), existe un gradiente único de equilibrio que es compatible con los 5°C del fondo; sin embargo, como se ha supuesto que la profundidad del agua embalsada es grande, esto último ocurrirá en grandes periodos de tiempo. En las figs 3.2 se muestran varios perfiles de estratificación de temperaturas de diferentes embalses, donde se observa que la estratificación no es mayor de los 5 ó 7m medidos desde la superficie (ref 5). Se puede concluir que la estratificación de un embalse grande ocurre en capas relativamente pequeñas comparadas con la profundidad total, que esto es similar en todos los embalses y que durante el periodo en que entra una avenida la estratificación no cambia sensiblemente.

En las ideas presentadas anteriormente se ha hecho hincapié en la estratificación de una sección vertical del vaso, sin embargo, a la luz de los trabajos experimentales realizados se juzga más importante la manera como dicha estratificación varía en la sección longitudinal del vaso. Si la información en cuanto a la variación de temperaturas en secciones

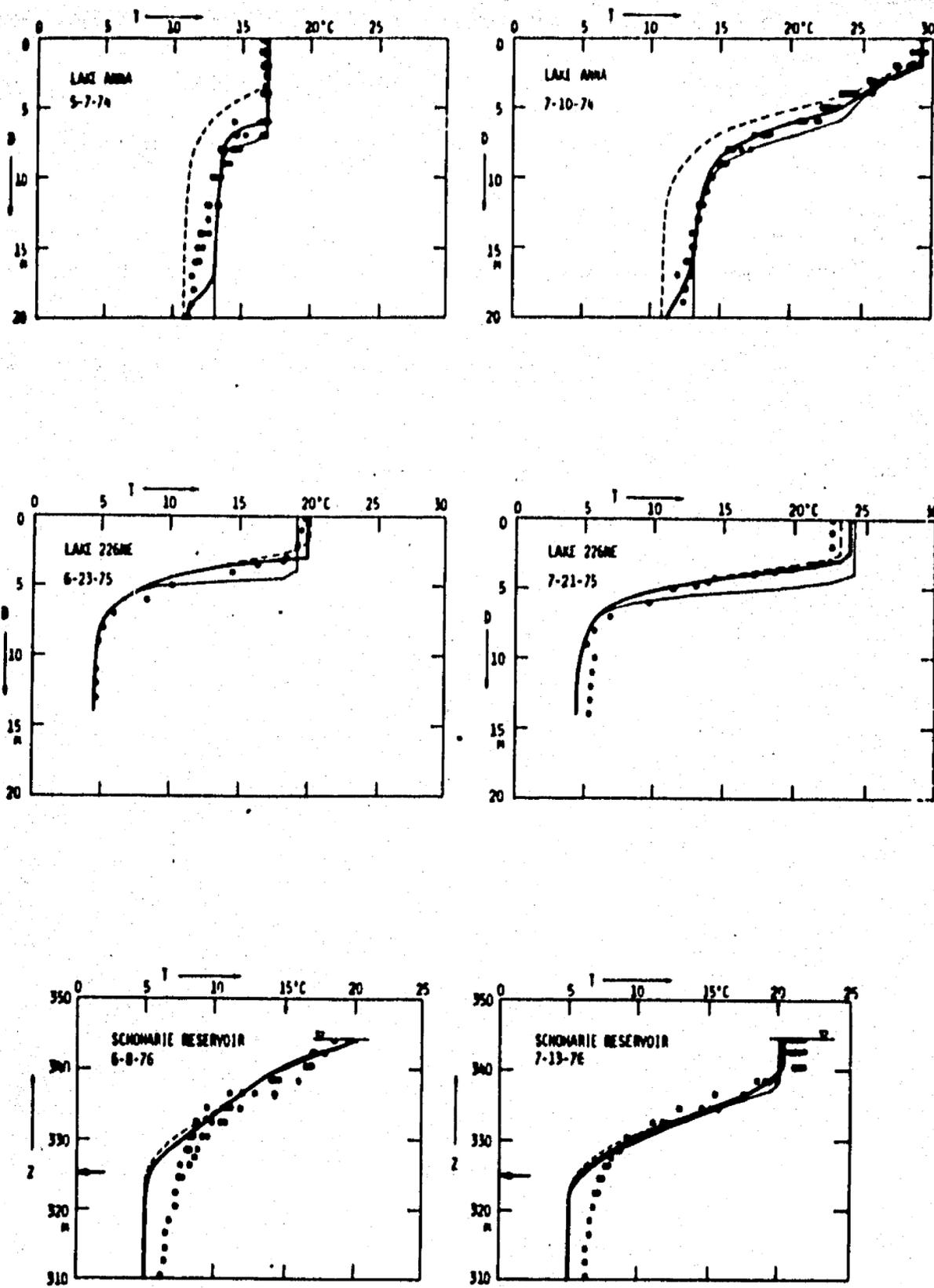


Fig 3.2 Estratificación de temperaturas
 (--- con mezclado por viento, — sin mezclado, ref. 5)

verticales es escasa, en cuanto a su variación a lo largo del vaso es prácticamente nula. En la fig 3.3 se reproduce la variación de temperaturas en la sección longitudinal de un vaso (ref 15), la cual, aunque es el producto de una simulación matemática concuerda bien con lo observado durante las pruebas realizadas en éste trabajo. Como puede observarse, en una sección cercana a la cortina la estratificación es efectivamente como se ha descrito anteriormente; sin embargo a la entrada del vaso es radicalmente diferente y sobre todo en una gran longitud de dicha entrada. Este hecho tiene gran relevancia pues el agua entrante se mezcla con el agua almacenada precisamente en esa zona de entrada, por lo cual la posterior evolución del sedimento dentro del vaso se verá condicionada por lo que ocurra en ese sitio.

En conclusión, en la segunda etapa se realizaron 12 pruebas, que resultan de la combinación de dos gastos con tres concentraciones y dos posibles distribuciones de temperaturas.

Se empleó una sola pendiente, debido a que cuando un embalse está estratificado el sedimento puede viajar por la parte superior o por alguna zona intermedia del vaso, donde ya no influye la pendiente del fondo y se escogió la de .02 por ser próxima a las pendientes comunes en los embalses.

Se empleó un solo material, ya que en la etapa anterior se observó que la influencia del material en cuanto a su com-

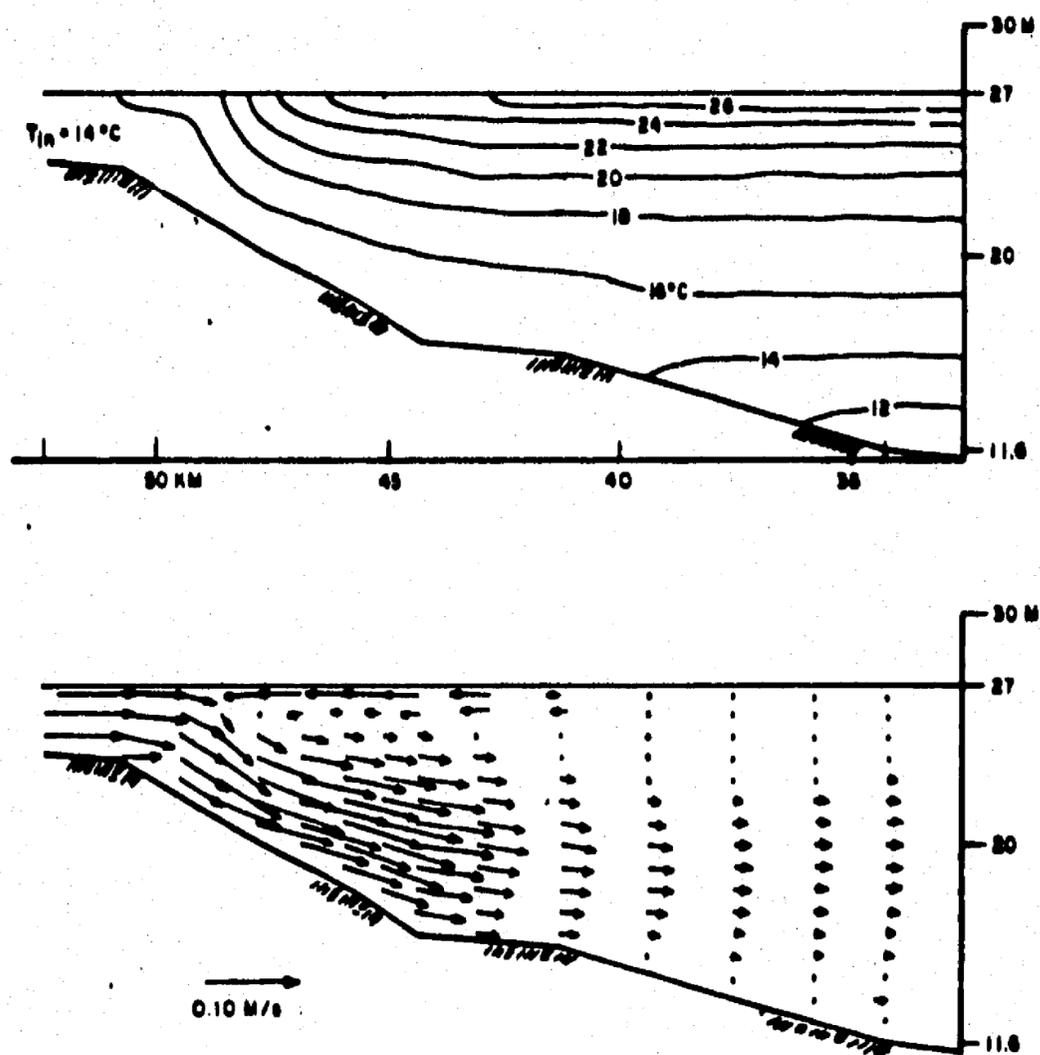


Fig. 3.3 Distribución de temperaturas y velocidades en el eje longitudinal de un embalse (ref. 15)

portamiento en la pendiente de .02, era indiferente del material empleado, y se escogió el caolín por mostrar características más similares a las reportadas en el comportamiento del sedimento en los prototipos (ref 19).

En el capítulo 4 se indican los detalles del procedimiento seguido al realizar las pruebas. En esta etapa se midieron principalmente longitudes de avance, tirantes y temperaturas.

Etapa III. Una vez analizados los casos con pendientes altas, queda por analizar el comportamiento del sedimento cuando las pendientes son muy bajas. Sin embargo, esto no es posible realizarlo en un modelo físico sin distorsión, dado que se requiere de longitudes muy grandes con tirantes muy pequeños. Por ejemplo, para una pendiente de $S_o=0.001$, suponiendo una altura de cortina en el modelo de 0.1m, la longitud del vaso sería $L = .1/0.001 = 100m$. En virtud de lo anterior, se plantea una serie de experimentos en la condición extrema de pendiente cero ($S_o=0$). El objetivo de estas pruebas fué adquirir más conocimiento sobre el fenómeno, para que, en función de los resultados de las etapas anteriores y los de ésta, fuera posible realizar una interpretación más confiable de lo que ocurre en pendientes muy bajas.

Puesto que la pendiente es nula, el agua almacenada tiene un

nivel horizontal, por tal motivo la entrada del agua con sedimento debe realizarse por algún sitio de la sección vertical del embalse. Ante la posibilidad de que esto influyera en el comportamiento posterior del sedimento (ya dentro del embalse), se probaron 3 diferentes posiciones de la entrada de agua: superficial, intermedia y de fondo. Se emplearon dos gastos de entrada 1 y 1/4 l/min con un volumen constante de 1 lt.

Se emplearon 4 diferentes tipos de distribución de temperaturas:

- 1) Temperatura constante de 5°C (agua fría sin estratificación)
- 2) Estratificación de temperaturas de 5°C (fondo) a 20°C (superficie)
- 3) Estratificación de temperaturas de 5°C (fondo) a 12°C (superficie)
- 4) Temperatura constante de 20°C (agua "caliente", sin estratificación)

En todos los casos la temperatura del agua de entrada fue de 20°C, con concentraciones de 1/2 y 2 gr/lt.

La selección de los perfiles de estratificación obedece a las mismas razones planteadas en la etapa anterior.

Los dos niveles de concentración son producto de la experiencia obtenida en la etapa anterior, pues concentraciones mayores de 3 gr/l viajan por el fondo.

En el capítulo 4 se indican los detalles del procedimiento seguido para realizar los experimentos de esta etapa, que fueron en total 48. Se midieron tirantes, longitudes de avance y temperaturas principalmente.

Etapa IV. Ante la necesidad de tener alguna comparación del comportamiento de los materiales seleccionados para realizar las pruebas, con el sedimento transportado por una corriente real, se realizaron pruebas con material sólido del Río Balsas, tomado en el sitio cercano a la presa El Caracol de la C F E. Para ello se realizaron 12 pruebas cuyas características y justificaciones se presentan a continuación.

a) Pendiente nula. Esto debido a que existe el interés de conocer el comportamiento del sedimento en suspensión en el embalse "El Caracol", el cual probablemente tiene una pendiente menor de .02

b) Distribución de temperaturas constante (5 y 20°C). Se escogieron estas distribuciones porque dada la gran magnitud

del embalse, la época de avenidas y el clima de la zona, se estima que la estratificación no es muy acentuada, por lo cual basta con representar dos condiciones, una probable en el vaso de 20°C y otra extrema de 5°C, ambas constantes en todo el vaso.

c) Dos tipos de material (caolín y material del balsas). Esto permite comparar el comportamiento del material de un caso real, con el empleado en las pruebas realizadas en las etapas anteriores, y por lo tanto será posible juzgar la semejanza entre el comportamiento de los sedimentos empleados en el laboratorio y los de un caso real.

d) Gasto de 1 l/min (vol= 1 lt). Este gasto se seleccionó considerando que el mayor volumen de sedimento entra al vaso en la época de avenidas, o sea cuando los gastos son muy altos y como 1 l/min es el máximo empleado en las pruebas antes realizadas se seleccionó este valor para comparar con los resultados de la etapa III.

e) Las concentraciones empleadas fueron de 1/2, 2, 5 y 10 gr/l, tratando de cubrir una amplia gama de posibilidades, ya que no se disponía de información de campo.

Etapa V. En esta última etapa, se estudió el efecto de la curvatura del eje longitudinal del vaso. Para ello se construyó un canal con curvas cuyas características se

indican en el capítulo 4.

Las pruebas realizadas en esta etapa tuvieron fines principalmente comparativos. Por esta razón se escogieron los siguientes parámetros, que corresponden a las condiciones de la etapa I.

- a) $S_o = 0.02$
- b) $Q = 1/4, 1/2$ y 1 lt/min
- c) $C = 1/2, 2, 5$ y 10 gr/l
- d) Sin estratificación
- y e) Sedimento: caolín

En total se realizaron 12 pruebas.

4.- CARACTERISTICAS DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL, EQUIPO Y RUTINA DE ENSAYOS

Para realizar las pruebas de las primeras cuatro etapas, se empleó un canal de pendiente variable de 3m de longitud, 0.1m de ancho y 0.3m de altura. Las pruebas de la etapa V se realizaron en un canal con curvas de dimensiones similares a las del canal recto anterior. En las figuras 4.1, 4.2 y en el apéndice C, se muestran las características generales de dichos canales. El canal recto fué construído con paredes de vidrio y fondo de aluminio, el curvo totalmente en acrílico.

TEMPERATURAS

En los casos de temperatura constante, se enfrió el agua empleando hielo (para 5°C) o se calentaba (para 20°C) mediante una resistencia eléctrica. Cuando se requería una

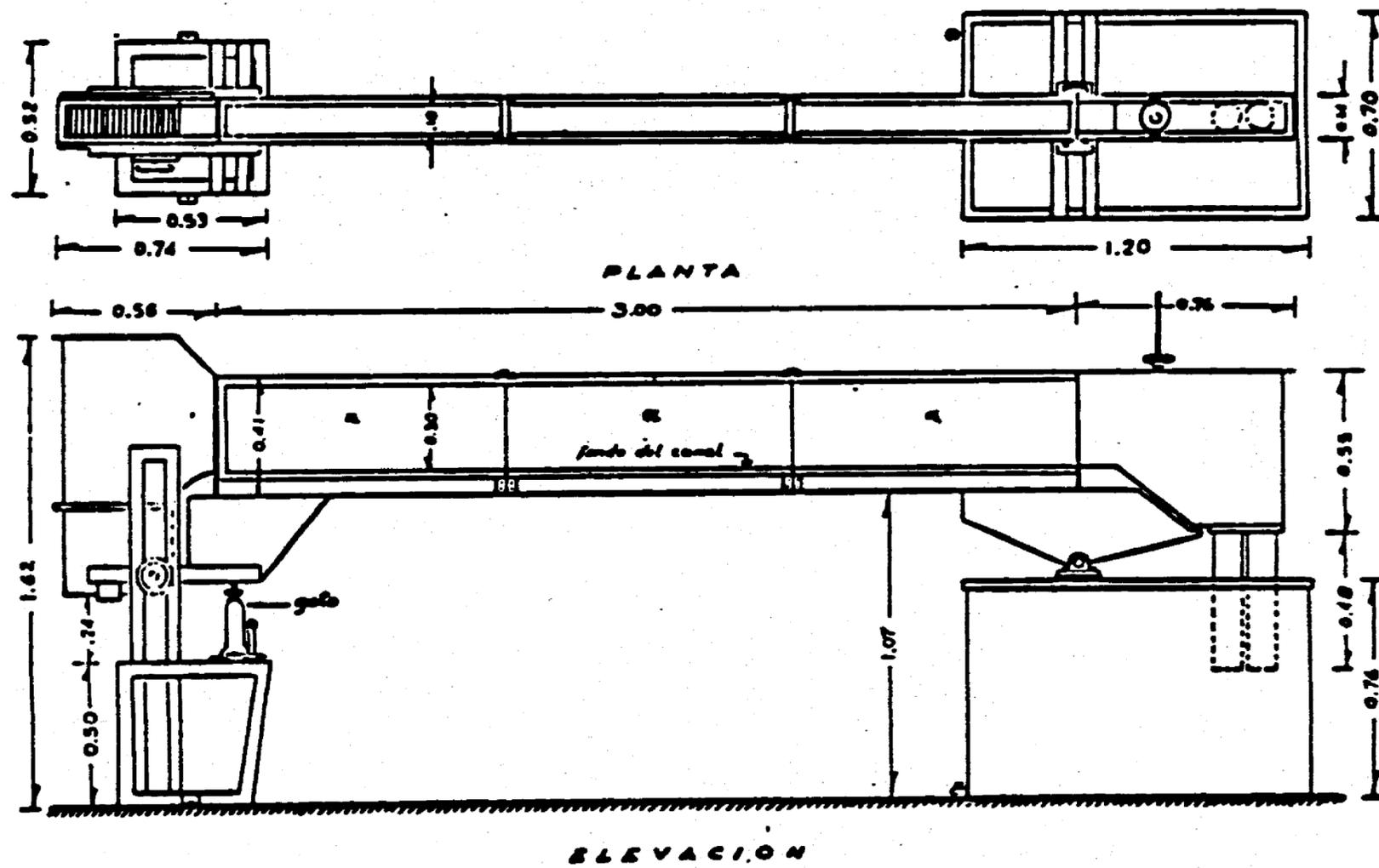


Fig. 4.1. Canal recto.

Material: Acrílico

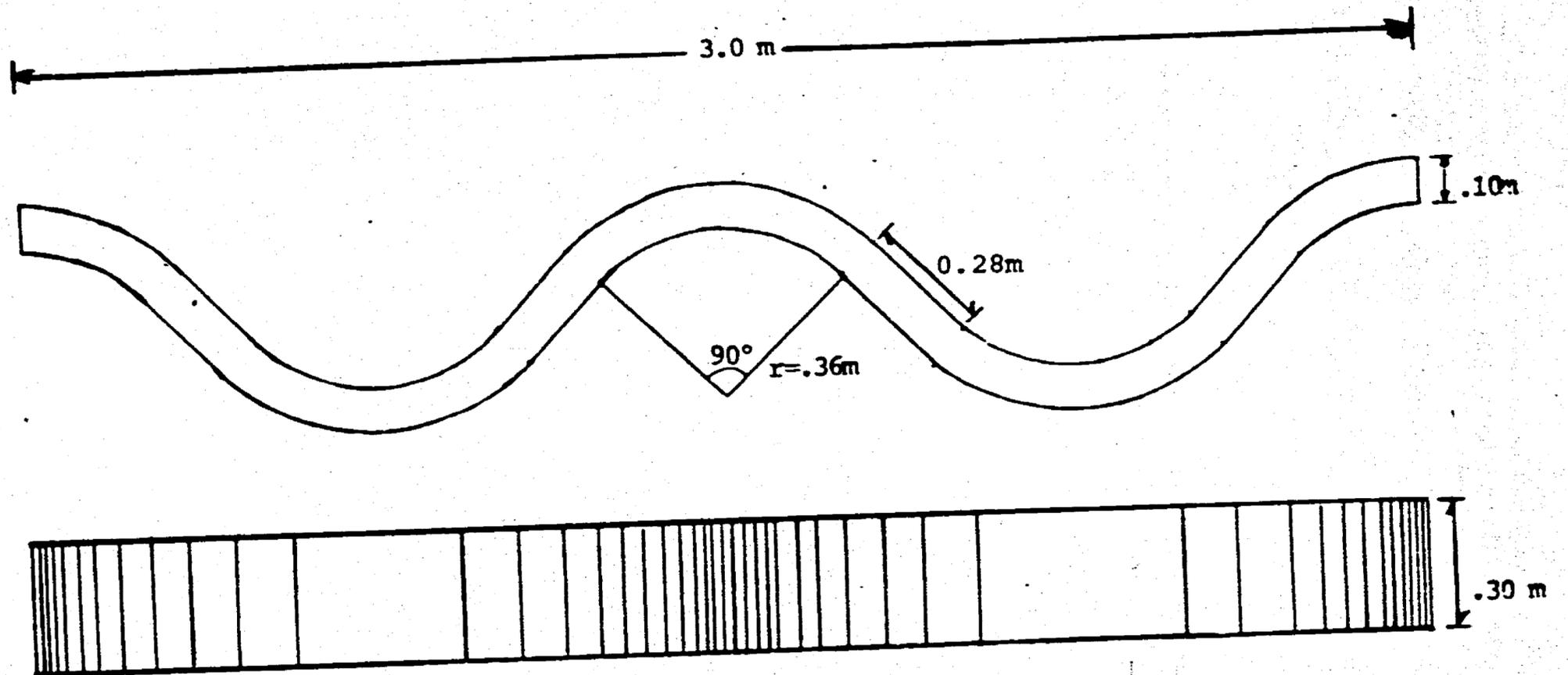


Fig. 4.2. Canal con curvas

estratificación de temperaturas primero se enfriaba totalmente el agua almacenada y luego, mediante la resistencia eléctrica que era colocada en la superficie del embalse, se calentaba gradualmente hasta alcanzar la estratificación deseada. Las temperaturas fueron medidas con diez termopares (Cooper-Constantan, $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, -10 a 100°C , diám. = 2mm) que tenía de referencia un punto frío a 0°C , y se empleó un voltmetro (Keithley, 191 Dig. Mult.), haciendo las lecturas mediante un selector manual de 10 canales. En el apéndice C se presenta una vista general de dicho sistema de medición.

GASTO DE ENTRADA

Para alimentar la mezcla agua-sedimento con gasto constante, se empleó una botella de Mariotte de 2 lts. previamente calibrada en cada prueba. El sedimento se mantuvo en suspensión dentro de la botella mediante un agitador magnético (Sybron/Termoline, mod. No.225, 40-180 rpm). La concentración de sedimento en la botella se determinaba empleando un densímetro tipo Bouyocos (-5 a 60 gr/lt).

FILMACION DE PRUEBAS

En el canal de pruebas, se instalaron escalas verticales y horizontales (aprox. $\pm 1\text{mm}$) para determinar longitudes y tirantes del material en suspensión. El tiempo se midió mediante un cronómetro Citizen digital.

La filmación de cada prueba se realizó con un equipo de video compuesto por una cámara (Sony, Mod. HVC-2200), un sistema de video (Sony, Mod. TT-2000), y una TV (Majestic, Mod. TVC-2085).

Durante las pruebas, la cámara se instaló en un sitio fijo al centro del canal. Las filmaciones se iniciaban al inyectar el gasto constante y terminaban cuando el sedimento se detenía en alguna zona intermedia del canal o cuando llegaba al extremo cerrado del mismo. La información complementaria (inicio o suspensión del gasto de entrada, descripción del fenómeno, etc.) se registraba en la misma cinta de filmación a través del sistema de sonido del equipo.

MUESTRAS DE CONCENTRACION

Para tomar muestras de concentración del sedimento dentro del canal, se emplearon pipetas de 0-10 ml (estándar), las cuales disponían de una perilla de succión para tomar muestras de agua de 1 cm³ aprox. Dichas pipetas eran colocadas en puntos fijos a lo largo del canal antes de iniciar cada prueba. La determinación de la concentración en cada pipeta se hacía mediante un rayo laser (Helium-Neon/4 mW, marca Spectra Physics, mod.404) y una celda fotoeléctrica de 0.45-.9 μ (Spectra Physics, mod. 404, con filtros de .003mW a 5W) previamente calibrados, empleando el principio del tur-

bidímetro. En el apéndice C se muestran los aspectos generales de este equipo. Las muestras de concentración, generalmente fueron tomadas al terminar cada prueba para evaluar el depósito del sedimento.

La determinación de las concentraciones promedio de la mezcla agua-sedimento dentro del canal se realizó a través de la comparación del volumen inyectado con el volumen ocupado dentro del canal, este último determinado de la filmación de cada prueba. Este procedimiento presentó grandes ventajas para la interpretación y el análisis.

INFORMACION ADICIONAL

Antes de realizar las pruebas, fué necesario efectuar algunos trabajos preliminares importantes como fueron la determinación de las viscosidades dinámicas de las mezclas, curvas granulométricas, y la determinación de los pesos específicos de los materiales en suspensión. Dichos trabajos fueron realizados en diferentes laboratorios (Fac. de Química, I.I. y SARH).

Independientemente del equipo antes señalado, también se empleó otro que puede considerarse como de rutina, tal como una balanza de precisión, matraces, probetas, termómetros etc.

Conviene señalar que la selección del equipo antes indicado obedece a los resultados de una serie de pruebas preliminares realizadas con dicho fin. Dichas pruebas consistieron en analizar diferentes tipos de sedimento, inyección de mezclas agua-sedimento, control de temperaturas, toma de muestras de concentración, medición de velocidades de avance, etc. Sin embargo, dada la naturaleza del fenómeno estudiado, el procedimiento empleado fué el más satisfactorio, aunque se reconoce que tiene limitaciones que serán comentadas en las conclusiones finales.

En el apéndice B se incluye información más detallada sobre los materiales empleados, curvas de calibración e información adicional empleada en las pruebas realizadas.

5.- RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en cada una de las etapas de experimentación planteadas en el capítulo 3. El material presentado es un condensado de lo que se ha considerado mas relevante, sabiendo que no es posible presentar toda la información obtenida en 124 ensayos; sin embargo, existe un archivo filmico y una memoria de cálculo detallada de cada prueba.

Etapas I. Como se indicó en el capítulo 3, en esta etapa se empleó la combinación de tres pendientes (.02, .04 y .06), tres gastos (1, 1/2 y 1/4 l/min), dos concentraciones (10 y 5 gr/l) y dos materiales (caolín y ceniza), permaneciendo constantes las temperaturas del agua embalsada y la del gasto entrante (20°C).

La descripción general de la evolución del sedimento es la

siguiente: al penetrar la mezcla agua-sedimento en el agua embalsada, ocurre ocupando toda la sección transversal disponible (fig 5.1). El movimiento es rápido hasta que se alcanza una cierta longitud, luego empieza a disminuir la velocidad y en cierto momento cesa de avanzar la corriente ocupando toda la sección transversal y aparece por el fondo una corriente de densidad. Esta viaja por el fondo a una velocidad casi constante mientras no se suspende el gasto de entrada. Cuando se detiene la entrada de la mezcla agua-sedimento la velocidad de avance empieza a disminuir. En las pendientes más altas (.04 y .06), la corriente de densidad llega hasta el extremo opuesto del canal y en la pendiente más baja (.02) se detiene en alguna zona intermedia del canal. En la fig 5.2 se muestran dos curvas de avance típicas obtenidas en las pruebas realizadas.

Para determinar la influencia de cada variable, se realizó un análisis multifactorial, ya que esto permitiría determinar la influencia de cada variable aislada, las interacciones y el error experimental. Siendo en este caso las pendientes gastos y concentraciones, los tratamientos y cada tipo de material empleado las repeticiones. Para ello se escogió un factor característico común en todas las pruebas, que fue la longitud recorrida al momento del corte. En las tablas 5.1 y 5.2 se muestran los resultados del análisis de varianza realizado. Para el caolín, las pendientes, los gastos y su interacción son los factores más importantes en el

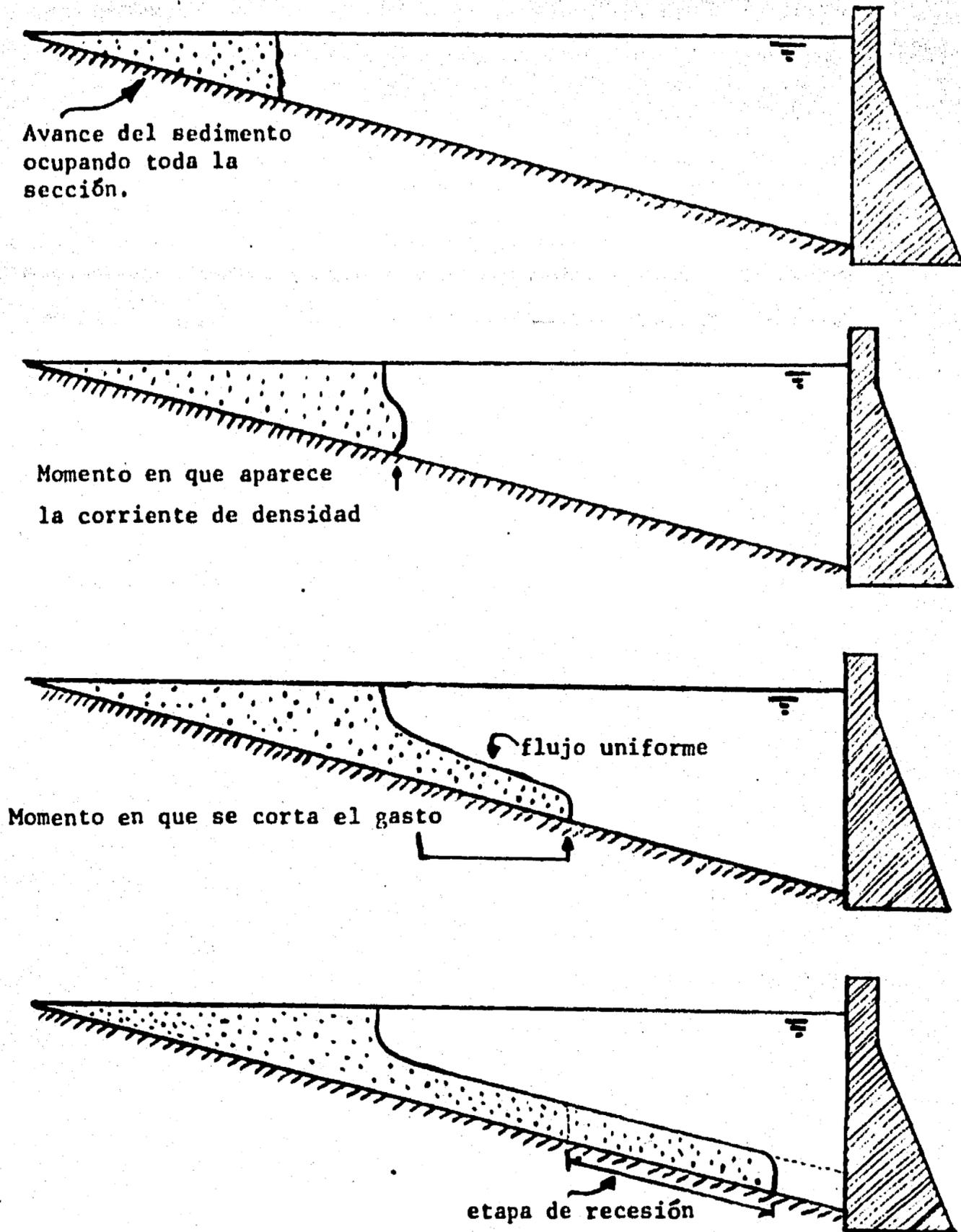


Fig 5.1 Evolución del material en suspensión

FIG. 5.2 AVANCE DE LA CORRIENTE DE DENSIDAD ($Q=1/4$ l/mn, caolín)

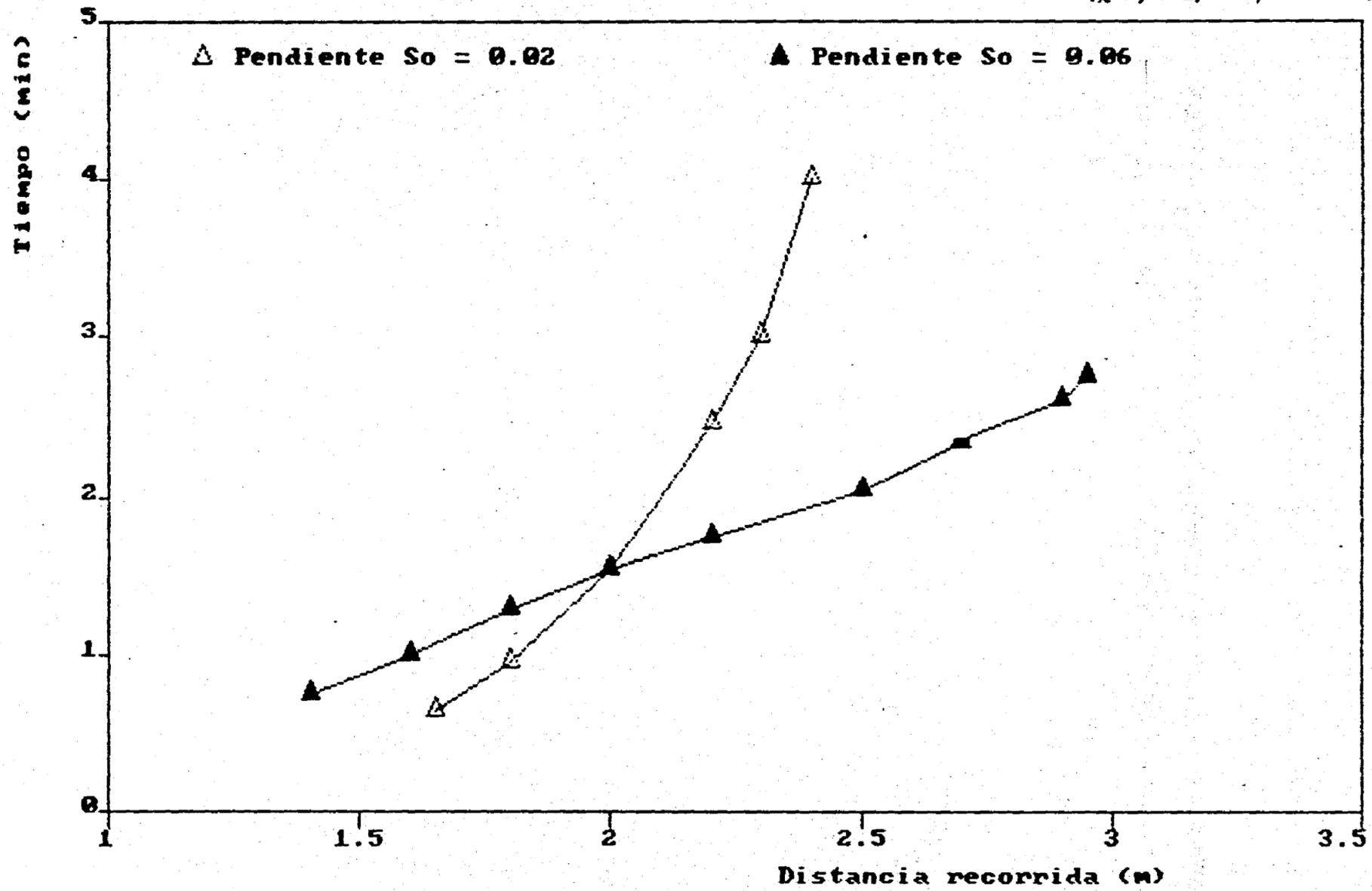


Tabla No. 5.1 Análisis multifactorial (Caolín)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Medias cuadradas	F	F tablas 5 % 10 %
Efectos principales					
So	2	5533	2767	27.2++	6.94 18.00
Q	2	6714	3357	33.6++	6.94 18.00
C	1	612	612	6.1	7.71 21.20
Interacciones					
So Q	4	6600	1650	16.5++	6.93 16.00
So C	2	1724	862	8.6+	6.94 18.00
Q C	2	430	215	2.2	6.94 18.00
Error	4	400	100		
Total	17	22013			

++ Significativo

Tabla No. 5.2 Análisis multifactorial (Ceniza)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Medias cuadradas	F	F tablas 5 % 10 %
Efectos principales					
So	2	1203	602	6.65	6.94 18.00
Q	2	7063	3532	39.0++	6.94 18.00
C	1	813	813	9.0+	7.71 21.20
Interacciones					
So Q	4	4518	1130	12.5+	6.93 16.00
So C	2	1580	790	8.73+	
Q C	2	585	293	3.24	
Error	4	362	90.5		
Total	17	16124			
++ Significativo					

fenómeno. Para la ceniza, el factor más relevante es el gasto y en segundo lugar la concentración, al igual que las interacciones de la pendiente con los otros factores.

Al comparar la relevancia de la pendiente, se observa que existe una diferencia significativa según el material empleado. Para encontrar la causa de esto, se realizó un análisis de varianza para cada pendiente. En las tablas 5.3 y 5.4 se muestran los resultados de dicho análisis. Se observa que para la pendiente más baja (.02) sólo influye ésta y sus interacciones, pues no son significativos ni el gasto ni la concentración, no así en la pendiente más alta (.06) donde ambos factores son los más importantes. Nótese que este resultado es similar para los dos materiales. Adicionalmente, también se empleó la técnica de las superficies de respuesta con buenos resultados al representar la zona de inmersión, sin embargo no era posible representar toda la evolución en el tiempo (ref. 12). En resumen, se puede concluir que la variable más importante es el gasto, luego la pendiente y finalmente la concentración. De las interacciones, la más importante es entre el gasto y la pendiente, aunque de segunda importancia respecto a las primeras. Los resultados anteriores sugirieron la posibilidad de representar, a través de números adimensionales, el avance del material en suspensión. Para esto, se plantearon diversas posibilidades a partir del teorema PI. Sin embargo, no se

Tabla No. 5.3 Análisis de pendientes (Caolín)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Medias cuadradas	F	F tablas 5 % 10 %
Qo					
So = 0.02		292	146	<1	5.79
So = 0.04	2	2413	1207	15.5++	13.30
So = 0.06		10668	5304	816 ++	
C					
So = 0.02		280	280	<1	6.61
So = 0.04	1	322	322	4.1	16.30
So = 0.06		1734	1734	267++	
Error					
So = 0.02		661	331		
So = 0.04	2	156	78		
So = 0.06		13	6.5		
Total	5	1233			
++ Significativo					

Tabla No. 5.4 Análisis de pendientes (Ceniza)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Medias cuadradas	F	F tablas 5 % 10 %
Qo					
So = 0.02		589	295	5.16	5.79
So = 0.04	2	2892	1446	17.0 +	13.30
So = 0.06		8100	4050	86.0++	
C					
So = 0.02		228	228	4.0	6.61
So = 0.04	1	661	661	7.74+	16.30
So = 0.06		1504	1504	32.0++	
Error					
So = 0.02		286	57.2		
So = 0.04	2	427	85.4		
So = 0.06		233	47.0		
Total	5	1103			

++ Significativo

obtuvieron resultados satisfactorios. Por ello se recurrió a plantear un esquema simplificado de las fuerzas actuantes en el movimiento de las corrientes de densidad, el cual condujo a la fórmula de Chezy, de aquí surgió la idea de proponer la fórmula de Manning (cap6) para determinar los parámetros adimensionales siguientes.

La fórmula de Manning en forma densimétrica es (ref. 28)

$$V = L/T = \frac{1}{n} R^{2/3} \left[\frac{W_2 - W}{W_2} S_0 \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

Siendo

V velocidad de la corriente (m/s)
 L longitud (m)
 T tiempo (s)
 n factor de Manning (s/m^{1/3})
 R radio hidráulico (m)
 W₂ peso específico de la mezcla agua-sedimento (gr/l)
 W peso específico del agua (gr/l)
 S₀ pendiente

si $C \approx F_1 (W_2 - W)$ y $R = yb / (2b + 2y)$

siendo C concentración de entrada (gr/l)
 F₁ factor de proporcionalidad
 b ancho del canal (m)
 y tirante de la corriente de densidad (m)

En las observaciones experimentales "y" es pequeño comparado con b, por lo cual

$$R \approx F_2 y/2$$

Substituyendo las consideraciones anteriores en (5.1) se

tiene que

$$\frac{L}{T} = F3 \frac{\sqrt{C}}{n\sqrt{W2}} \frac{\sqrt{S0}}{\sqrt[3]{J4}} y^{2/3} \quad (5.2)$$

Siendo $F3 = \sqrt{F1} \sqrt[3]{F2^2}$

dividiendo ambos miembros de (5.2) entre QT_c/b^2y se tiene

$$\frac{Lb^2y}{QT_cT} = F3 \frac{\sqrt{C}}{n\sqrt{W2}} \frac{\sqrt{S0}}{\sqrt[3]{J4}} y^{2/3} \frac{b^2 y}{QT_c} \quad (5.3)$$

siendo Q gasto (m^3/s) y

T_c tiempo en que se corta el gasto (s)

simplificando (5.3) y como $y \approx QT_c/Lb$ (L es la longitud recorrida), se tiene

$$\frac{Lb^2}{QT_c} = F3 \frac{\sqrt{C}}{n\sqrt{W2}} \frac{\sqrt{S0}}{\sqrt[3]{J4}} \frac{b^2 T}{QT_c} \left[\frac{Q T_c}{L b} \right]^{2/3} \quad (5.4)$$

multiplicando ambos miembros de (5.4) por $L^{2/3}/b^{2/3}$ y

simplificando

$$\frac{L^{5/3} b^2}{QT_c b^{2/3}} = F3 \frac{\sqrt{C}}{n\sqrt{W2}} \frac{\sqrt{S0}}{\sqrt[3]{J4}} \frac{b^{2/3} T}{\sqrt[3]{J}(QT_c)} \quad (5.5)$$

Finalmente, como se desconoce el valor de $F3$ se puede establecer la ecuación (5.5) como la siguiente proporcionalidad

$$\frac{L^{5/3} b^{4/3}}{QT_c} \alpha = \frac{JC JS_0}{n JW2 \rho J4} \frac{b^{5/3} T}{\rho J(QT_c)} \quad (5.6)$$

por lo cual se pueden establecer dos parámetros adimensionales de L t T como:

$$A = \frac{JC JS_0 b^{2/3} T}{n JW2 \rho J4 \rho J(QT_c)} \quad (5.7)$$

$$y \quad D = \frac{L^{5/3} b^{4/3}}{Q T_c}$$

Entonces A y D son dos números adimensionales que representan el comportamiento de las corrientes de densidad a través del tiempo. Nótese que en cada prueba sólo L y T son variables.

En las Figs 5.3, se muestran las gráficas de A vs D para las pruebas correspondientes a las pendientes de .04 y .06. Como puede observarse existe una buena agrupación de puntos en función del tiempo considerado. En dichas figuras se incluyen los coeficientes de correlación de las curvas ajustadas, los cuales son satisfactorios. Obsérvese que dicha gráfica permite explicar el comportamiento de las corrientes a través del tiempo, cualquiera que sea el gasto, la concentración o el material empleado. Los tirantes promedio de las corrientes de densidad fueron de .015m.

FIG. 5.3a $0.5 T_c$

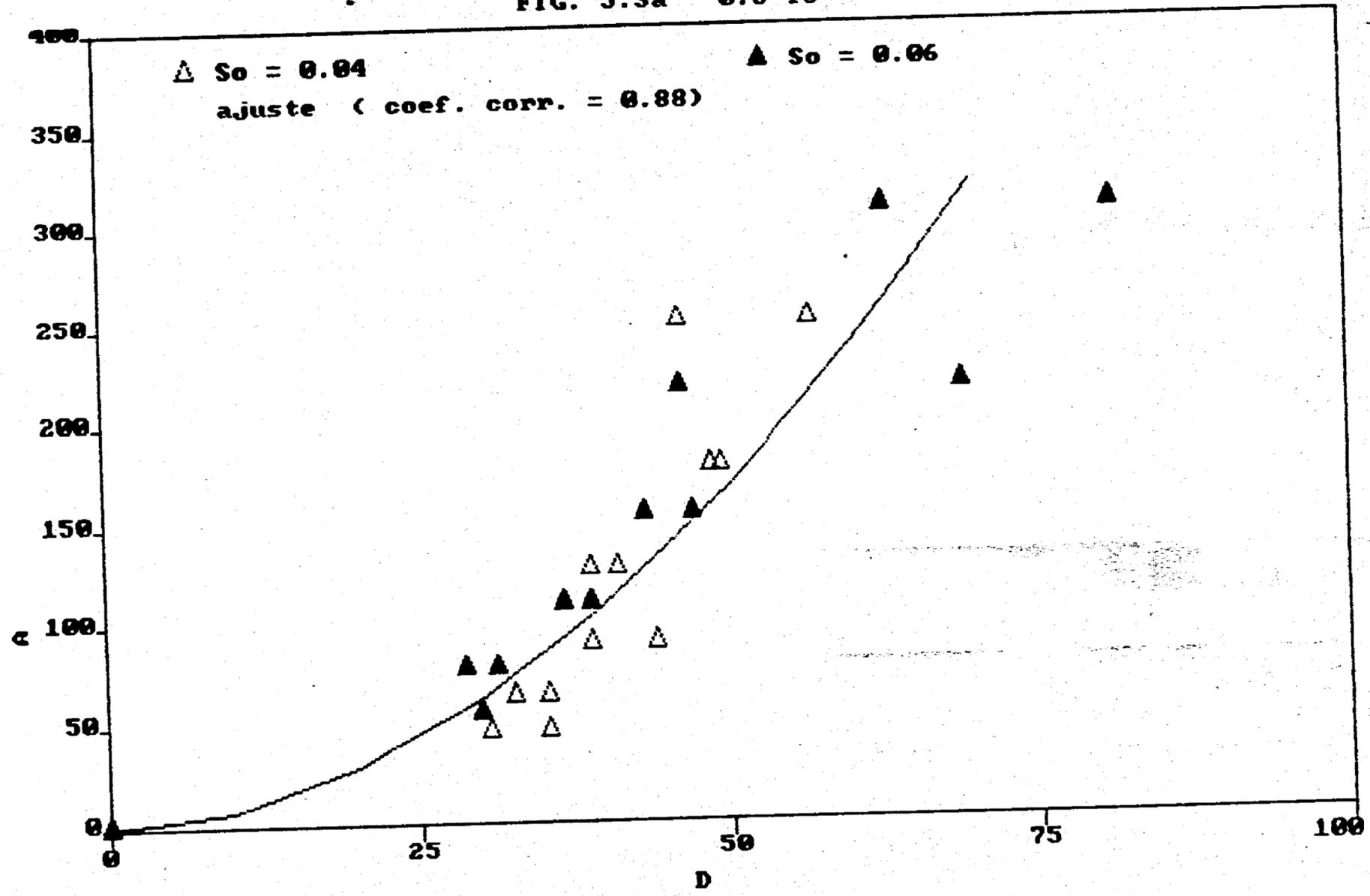


FIG. 5.3b 1 Tc

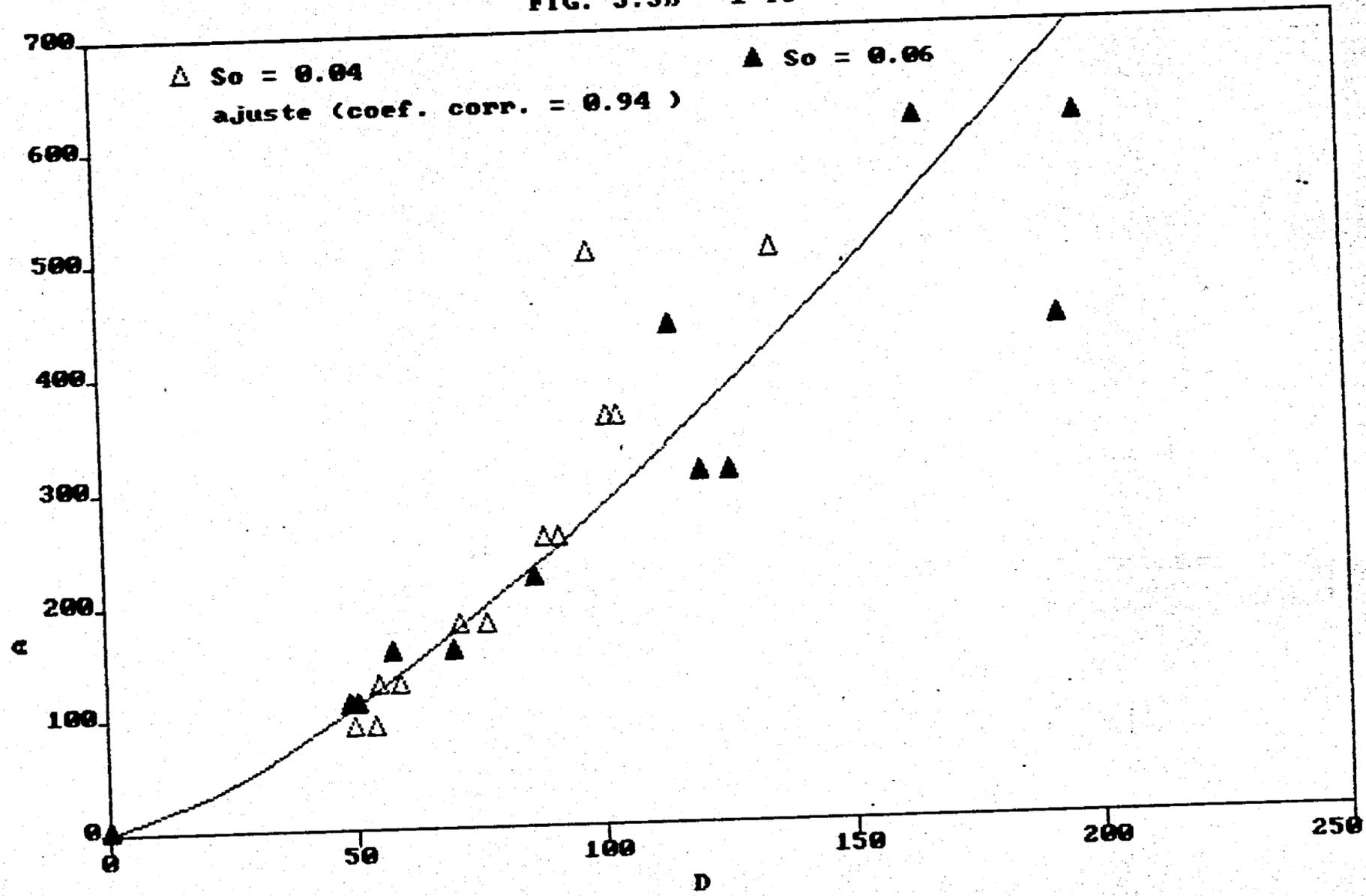


FIG. 5.3c 1.5 Tc

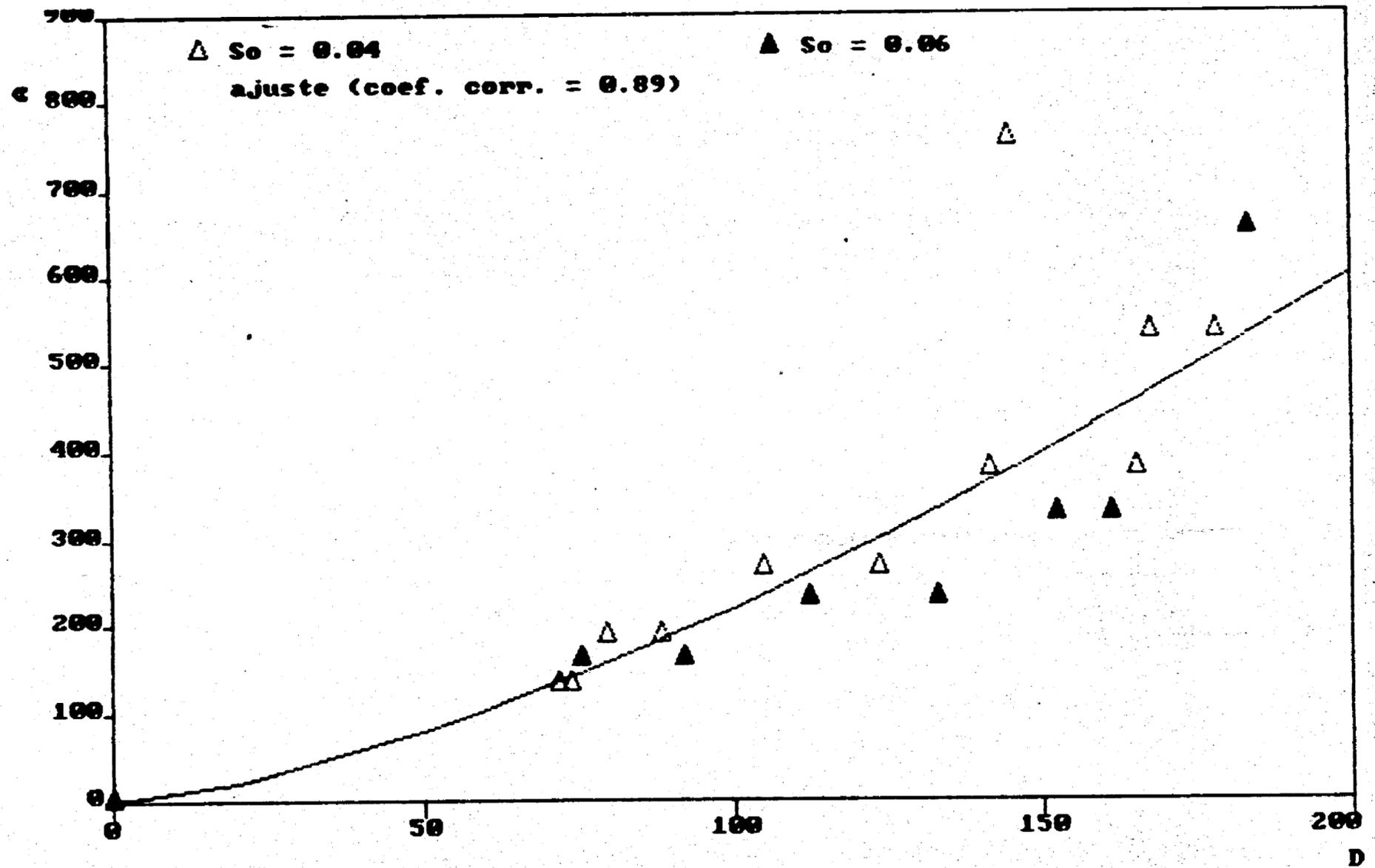


FIG. 5.3d 2 Tc

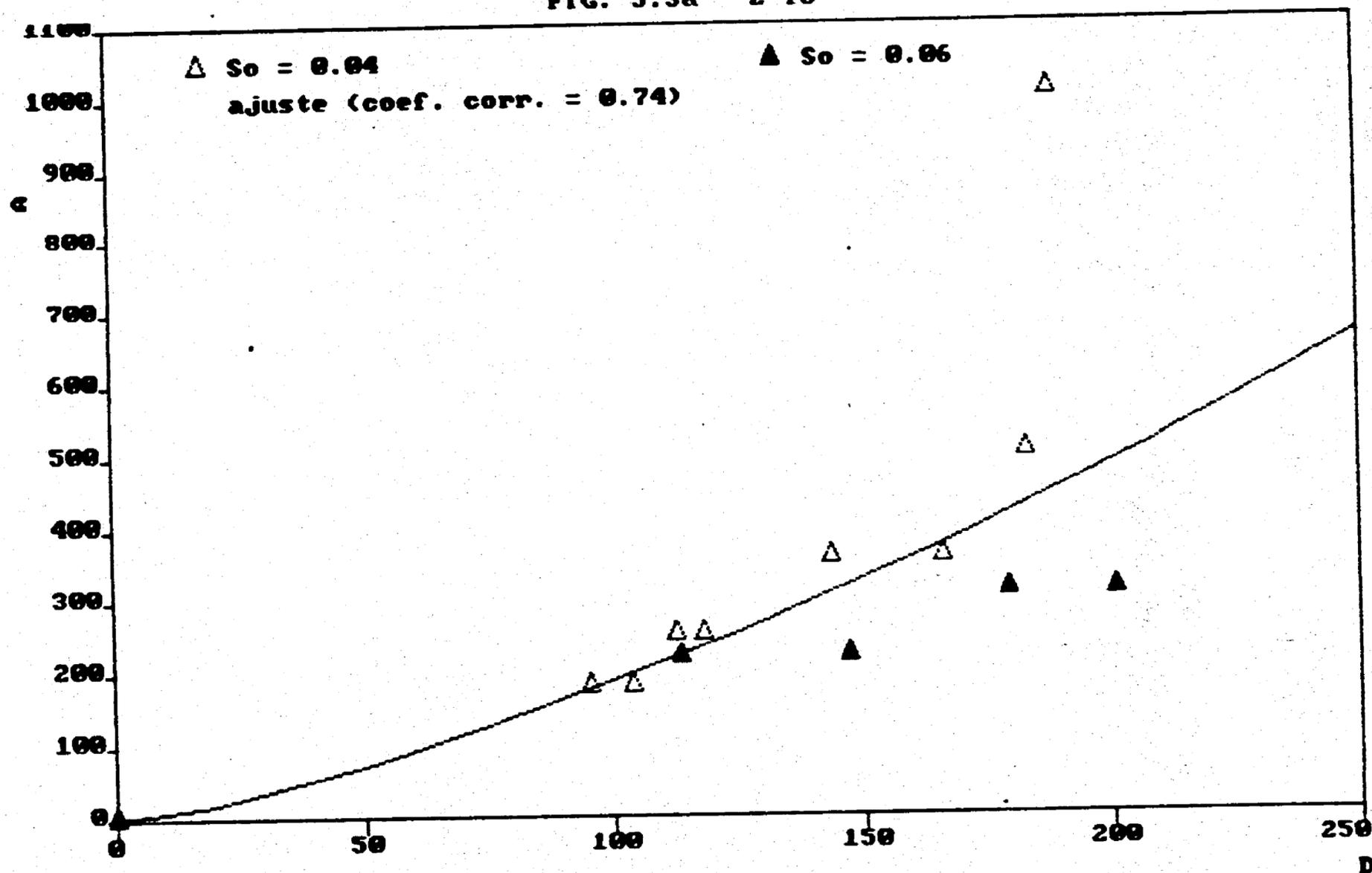
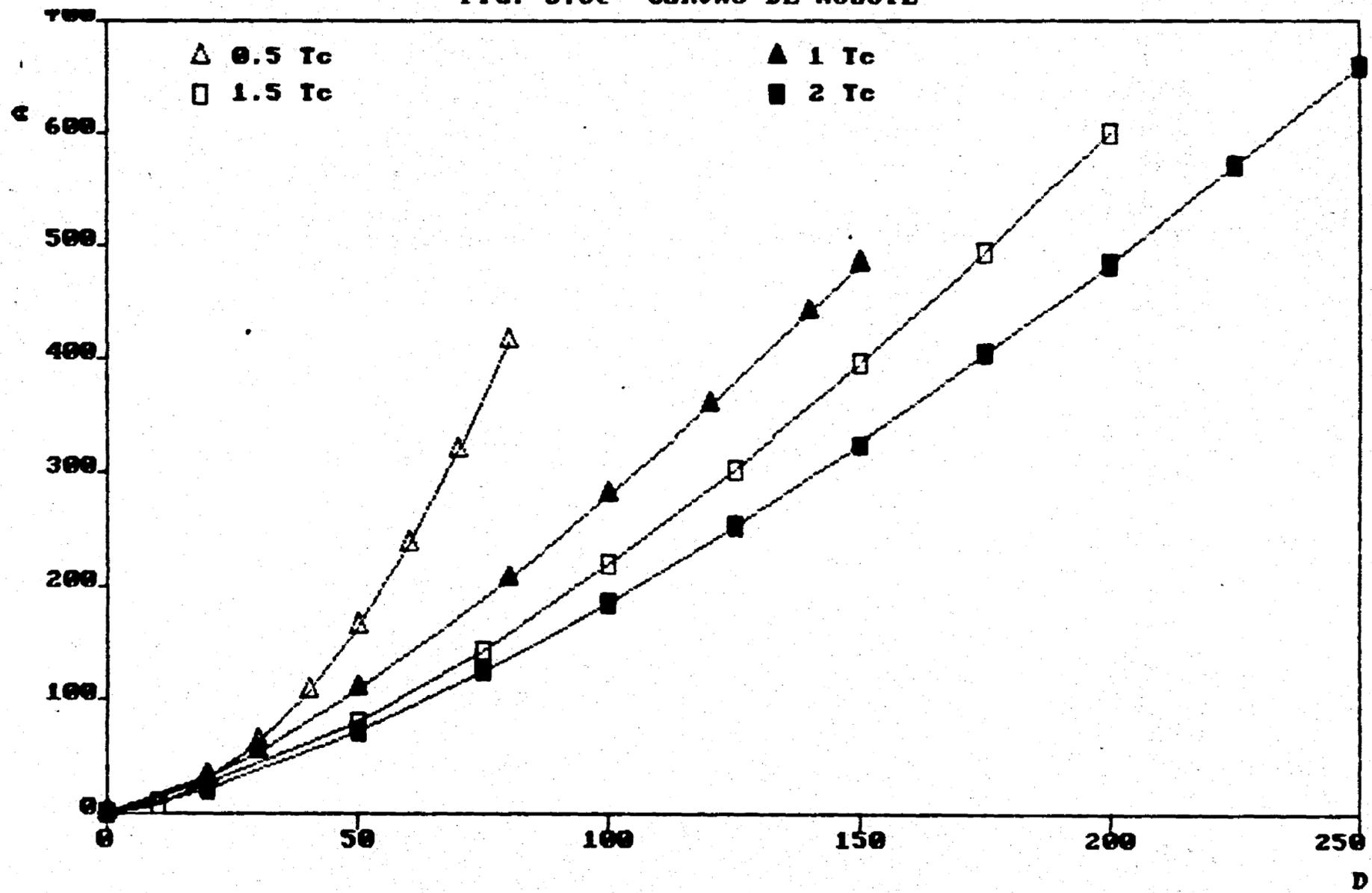


FIG. 5.3e CURVAS DE AJUSTE

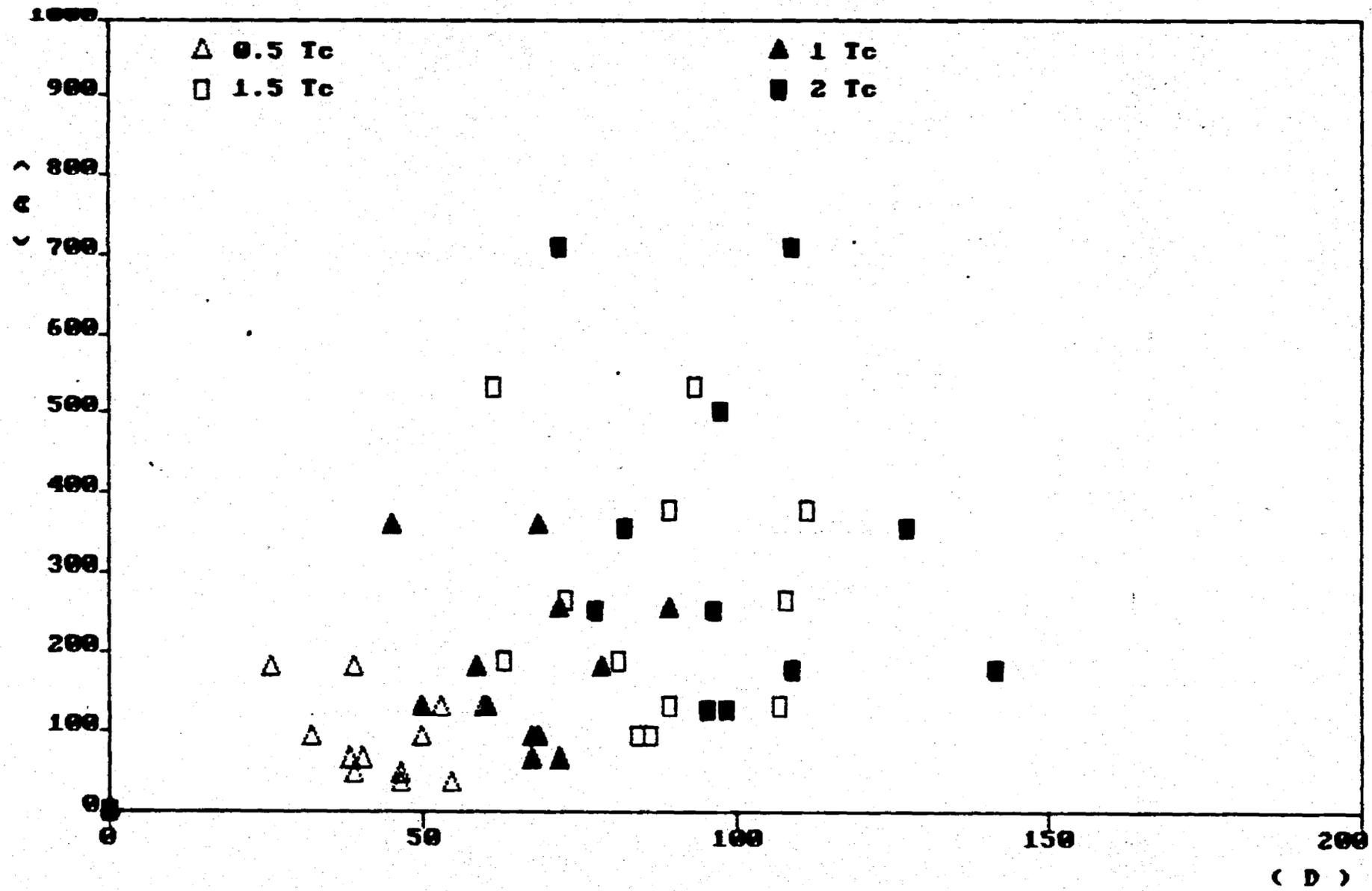


En las gráficas de A vs D correspondientes a la pendiente más baja (.02) (fig 5.4), no se obtuvo igualmente satisfactorio. Esto se atribuye a la gran diferencia de comportamiento del sedimento respecto al de las pendientes más altas. Récuérdese que esto ya había sido observado en el análisis de varianza.

Para determinar la causa de la diferencia anteriormente señalada, se estudiaron con mayor detenimiento las filmaciones realizadas, y se observó que mientras en las pendientes más altas la zona de inmersión era una pequeña parte del recorrido total de la corriente, en la pendiente baja dicha zona constituía una parte importante del avance total. Si se considera que los números adimensionales empleados provienen de una ecuación que representa básicamente la velocidad de la corriente una vez que esta se ha formado, esto implica que en la medida en que dicha corriente esté más desarrollada, se tendrá una mejor representación con los parámetros propuestos.

Lo anterior explica el porqué los números adimensionales propuestos son satisfactorios en las pendientes de 0.04 y .06, pero no explica la evolución del sedimento en la pendiente de .02. Buscando una explicación a esto, se observó que en todas las pruebas el avance del sedimento en el embalse ocurría ocupando toda la sección transversal hasta

FIG. 5.4 PENDIENTE $S_o=0.02$



alcanzar alcanzar una cierta longitud, donde repentinamente aparecía por el fondo la corriente de densidad. En términos generales el sitio donde aparecía dicha corriente permanecía fijo durante el resto de la prueba y ello constituía la denominada zona de inmersión. Esto llevó a imaginar la siguiente explicación del tal comportamiento: al penetrar el agua con sedimento al embalse, ocurre un mezclado importante con el agua almacenada, dicho mezclado ocurre ocupando toda la sección transversal, por lo cual el sedimento avanzará en esas condiciones hasta que la concentración de sedimento no puede ser mantenida con el tirante del frente de avance, en cuyo caso se romperá el equilibrio y aparecerá una corriente de densidad por el fondo.

La consideración anterior llevó a plantear la posible existencia de ciertas condiciones críticas de tirante y concentración, en las que el sedimento ya no puede viajar ocupando toda la sección, y sólo lo puede hacer como una corriente de densidad.

Para determinar tales condiciones críticas, a partir de la información experimental, se planteó lo siguiente.

En el capítulo 6 se demuestra que el avance en la zona de inmersión puede representarse como

$$L = J(2Q/T / (S_0 b^3 M)) \quad (6.4)$$

y que la condición crítica puede establecerse como

$$(MY)_c = J((2 Q S_0 M/b) \# t) \quad (6.10)$$

dicha condición puede interpretarse diciendo que existe una combinación de M y Y tal que la corriente no puede continuar viajando ocupando toda la sección y por lo tanto es la condición para que aparezca la corriente de densidad.

En el apéndice A, se muestran los valores del producto $(MY)_c$ al aparecer la corriente de todas las pruebas realizadas. Como puede observarse, existe una ligera variación con el gasto, sin embargo, conviene señalar que el determinar el momento preciso en que aparecen las corrientes es difícil de precisar dadas las características del fenómeno, pues el avance es muy difuso y en momentos aparece la corriente y en otros desaparece, es más, en ciertas condiciones no llega a formarse la corriente de densidad. Es conveniente notar que en la determinación de $(MY)_c$ no sólo se emplearon las pruebas de la pendiente de .02, sino también las de .04 y .06, observándose que existe una gran consistencia de los resultados independientemente del gasto, concentración, pendiente y el tipo de material.

PARAMETROS ADIMENSIONALES A1 y D1

De lo expuesto en los párrafos anteriores, se propuso representar el avance de la corriente en la pendiente de .02 empleando dos nuevos parámetros adimensionales (A1 y D1), cuya deducción se presenta a continuación.

Recurriendo a la ecuación (6.4), elevando al cuadrado, dividiendo entre T_c (tiempo de corte) y simplificando se obtiene

$$\frac{t}{T_c} = \frac{L^2 b S_0 M}{2 Q T_c} \quad (5.8)$$

puesto que se desconoce M , se puede plantear la siguiente proporción

$$\frac{t}{T_c} \propto \frac{L^2 b S_0}{2 Q T_c} \quad (5.9)$$

por lo cual los parámetros adimensionales de t y L son

$$A1 = t/T_c$$

$$y \quad D1 = \left[\frac{S_0 b}{2 Q T_c} \right]^{1/2} L \quad (5.10)$$

En las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 se presentan las curvas de avance (adimensionales) para la pendiente de .02. Como se puede observar, existe una mejor representación a través de los parámetros $A1$ y $D1$, en vez de los presentados en la gráfica A y D de la figura 5.4. Las principales características de dichas gráficas son las siguientes:

- a) Las curvas de avance presentan una recesión muy acentuada
- b) La concentración, en este caso, no es un factor determinante
- c) Los parámetros adimensionales representan bien el compor-

FIG. 5.5 PENDIENTE $S_0=0.02$ ($Q=1/4$)

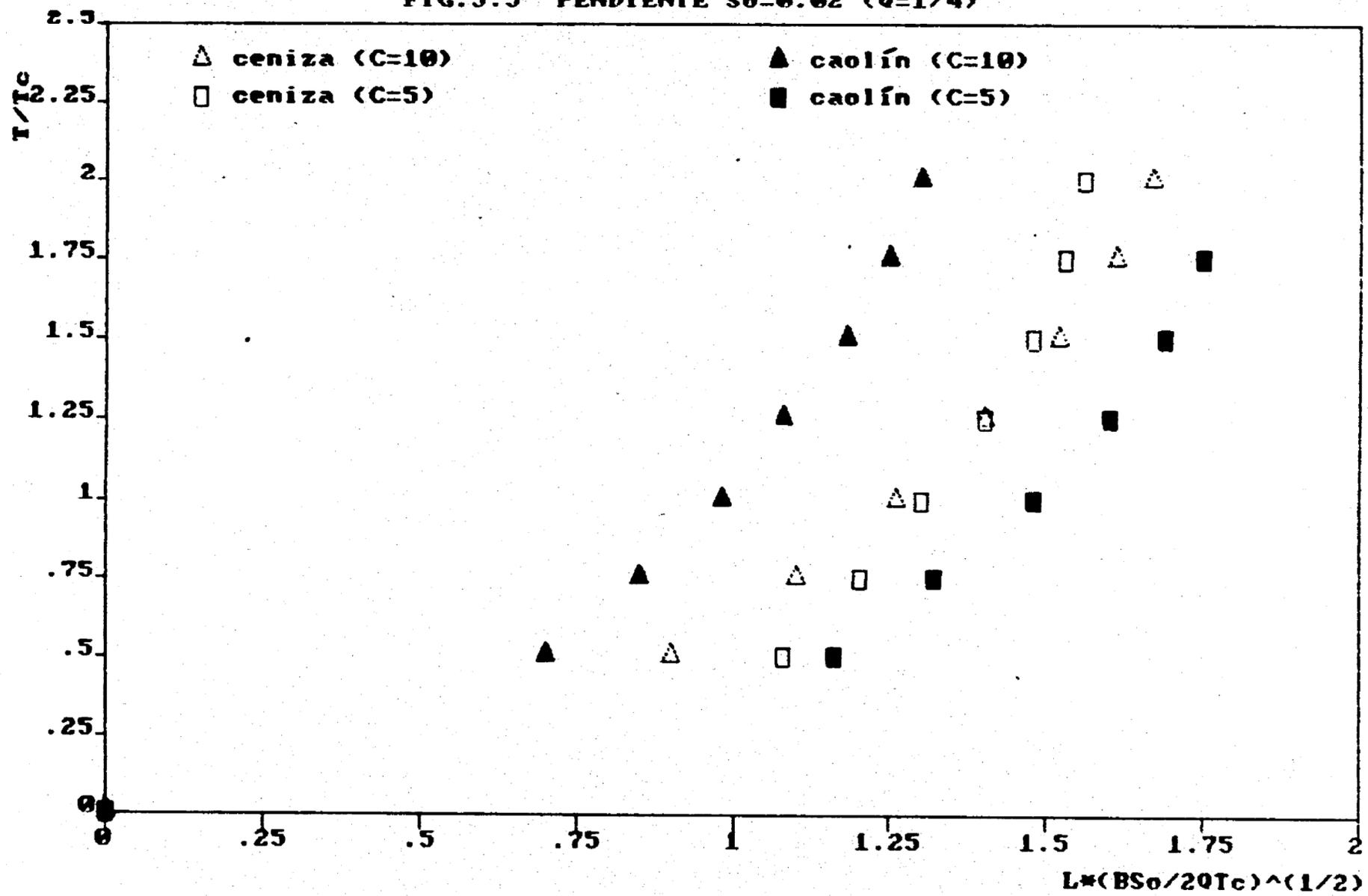


FIG.5.6 PENDIENTE $S_o=0.02$ ($Q=1/2$)

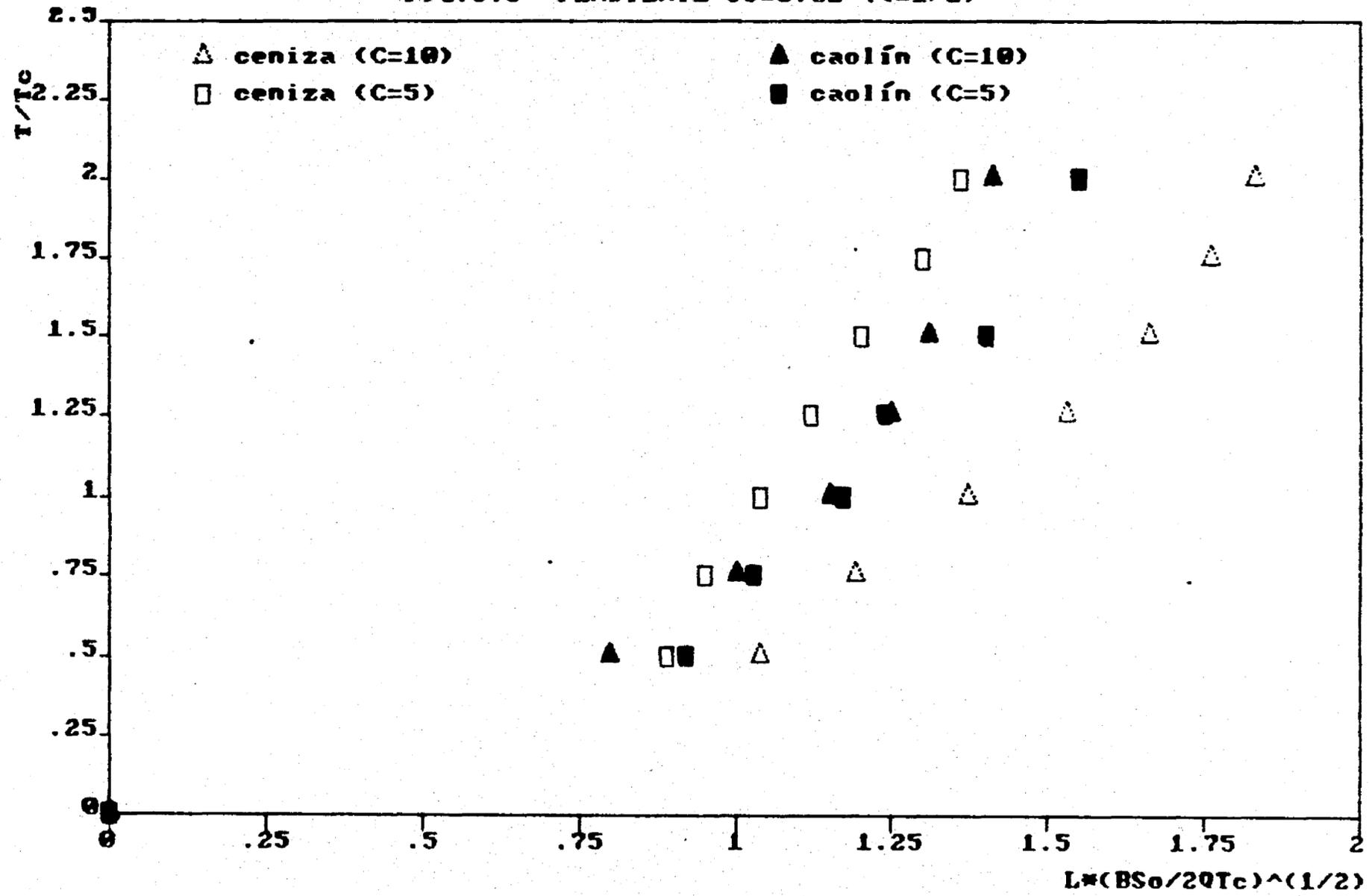
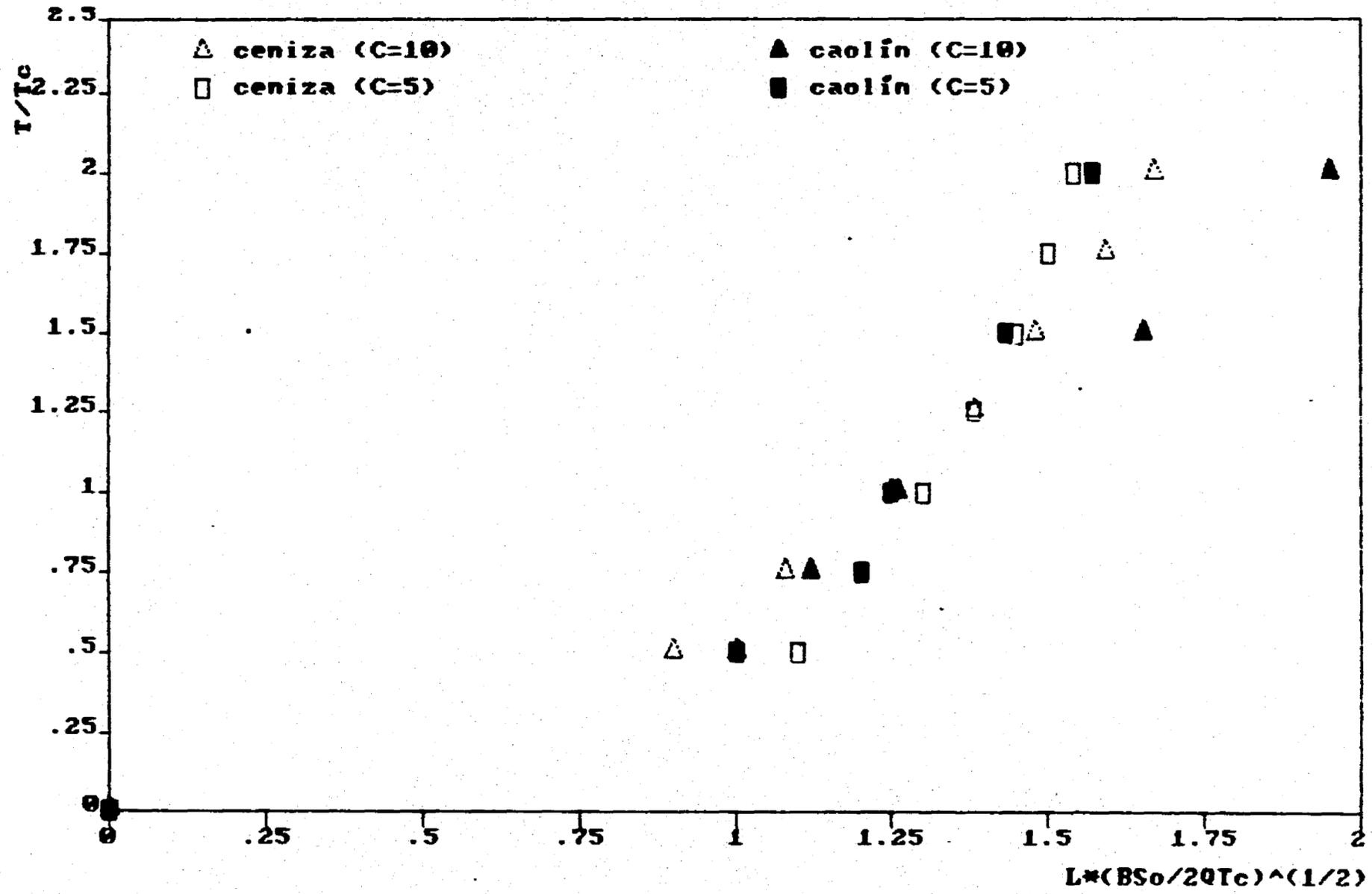


FIG.5.7 PENDIENTE $S_o=0.02$ ($Q=1$)



tamiento de las corrientes.

DEPOSITO DE SEDIMENTO

La interpretación de las curvas de depósito de sedimento es difícil, debido a los problemas de medir concentraciones en un canal pequeño. La mejor descripción de los resultados que fué posible obtener, se muestra en las figuras 5.8 y 5.9 donde se presentan algunas curvas de depósito acumulado promedio. En dichas gráficas se emplearon los parámetros (P/P_0) para representar el depósito acumulado, con P (gr) el sedimento depositado, P_0 (gr) la cantidad total de sedimento introducida, y L/L_c la distancia donde ocurre el depósito, siendo L una distancia (m) y L_c (m) la distancia alcanzada al momento del corte. Los principales comentarios a las gráficas de depósito de sedimento son los siguientes: a) para las pendientes bajas (.02), existe un solo patrón de depósito, independientemente de la concentración de entrada, el tipo de material sólido empleado y el gasto. b) En la pendiente intermedia (.04), si la concentración es baja influye el gasto y si es alta, además influye el material. c) en la pendiente más alta (.06), si la concentración es baja influye mucho el gasto, y si es alta influye mucho el material.

En la gráfica 5.9, nótese que el depósito depende del tipo

FIG.5.8 PENDIENTE $S_o=0.02$ (caolin, ceniza)

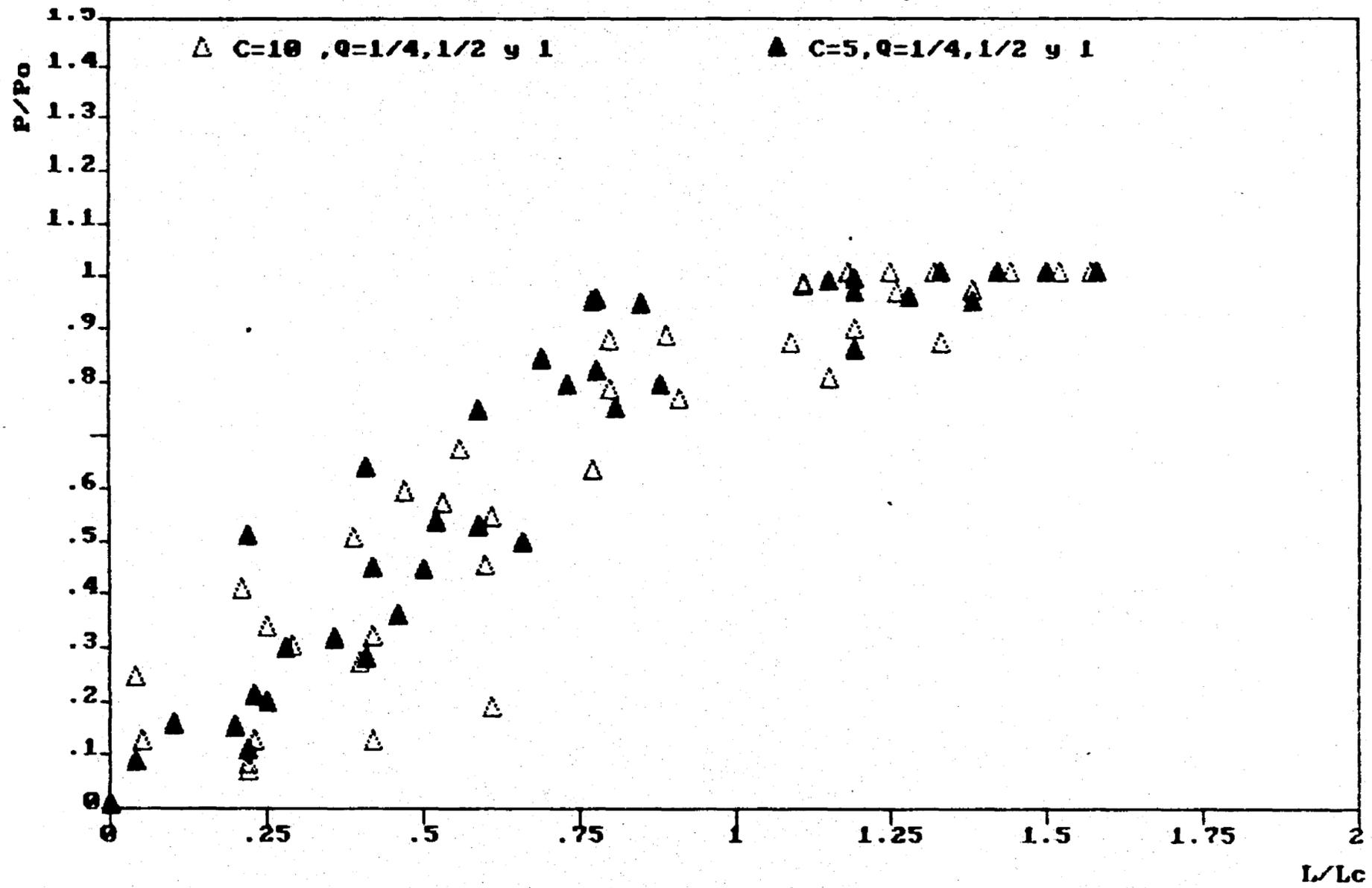
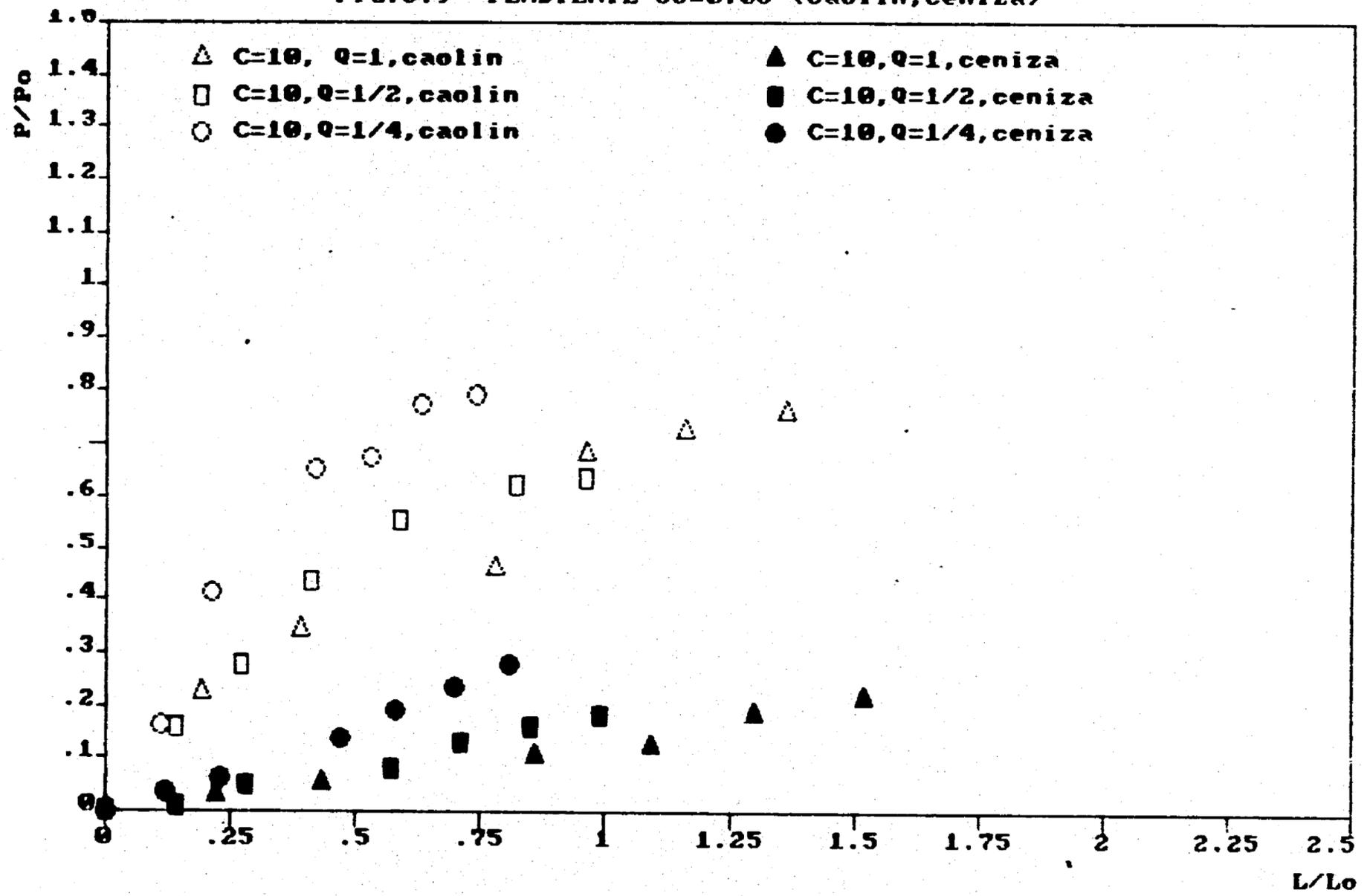


FIG.5.9 PENDIENTE $S_o=0.06$ (caolin, ceniza)



de material, pues mientras las curvas correspondientes al caolín se encuentran en la parte superior y son cóncavas hacia abajo, las correspondientes a la ceniza están abajo y son cóncavas hacia arriba. Esto implica por ejemplo, que para una distancia de $L/L_c = 0.5$ y $Q = 1/2$ l/min, mientras la ceniza ha depositado el 70% en el caolín sólo ha sido del 25%.

Es conveniente señalar que de acuerdo con el diámetro medio del sedimento, la velocidad de caída de la ceniza es casi diez veces más alta que la del caolín. Sin embargo, en las pruebas realizadas en el laboratorio, dichas velocidades fueron similares. La interpretación realizada indicó que existe un efecto de floculación importante en el caso del caolín. Es claro que en las pruebas realizadas (ensayos) se podría haber empleado algún defloculante, sin embargo, se consideró que esto estaría más alejado de la similitud con algún caso real.

Etapa II. Recordando lo señalado en el capítulo 3, respecto al planteamiento de las pruebas de esta etapa, se emplearía una sola pendiente (.02) y dos grupos de pruebas, uno en embalse con temperatura constante de 5°C y el otro con una estratificación de 5°C en el fondo y 20°C en la superficie, empleando dos gastos y tres concentraciones.

En el apéndice A se presentan los parámetros principales del

fenómeno, y en las figuras 5.10, 5.11 y 5.12, las curvas de avance adimensionales. Como se puede observar, dichas curvas presentan un marcado decaimiento y prácticamente todas son iguales.

El comportamiento de estas corrientes es muy similar al descrito en la etapa anterior, sin embargo aquí destaca lo acentuado de la curva de recesión.

Las reflexiones más importantes en esta etapa son las siguientes.

a) La concentración de entrada no afecta el comportamiento de la corriente. El mezclado (M) al momento del corte es igual para ambas estratificaciones, .6 para 5°C constantes y .55 para la estratificación de 5-20°C.

b) En todas las pruebas realizadas, se observó que al suspender el gasto de entrada, la corriente casi se detenía inmediatamente,

c) En las pruebas de $Q = 1$ l/min con y sin estratificación de temperaturas para 2gr/l, no se formó la corriente de densidad.

d) La temperatura promedio del agua en la zona de mezclado es constante. En las figs 5.13 y 5.14, se muestran los

FIG.5.10 PENDIENTE $S_o=0.02$ ($C=1/2$)

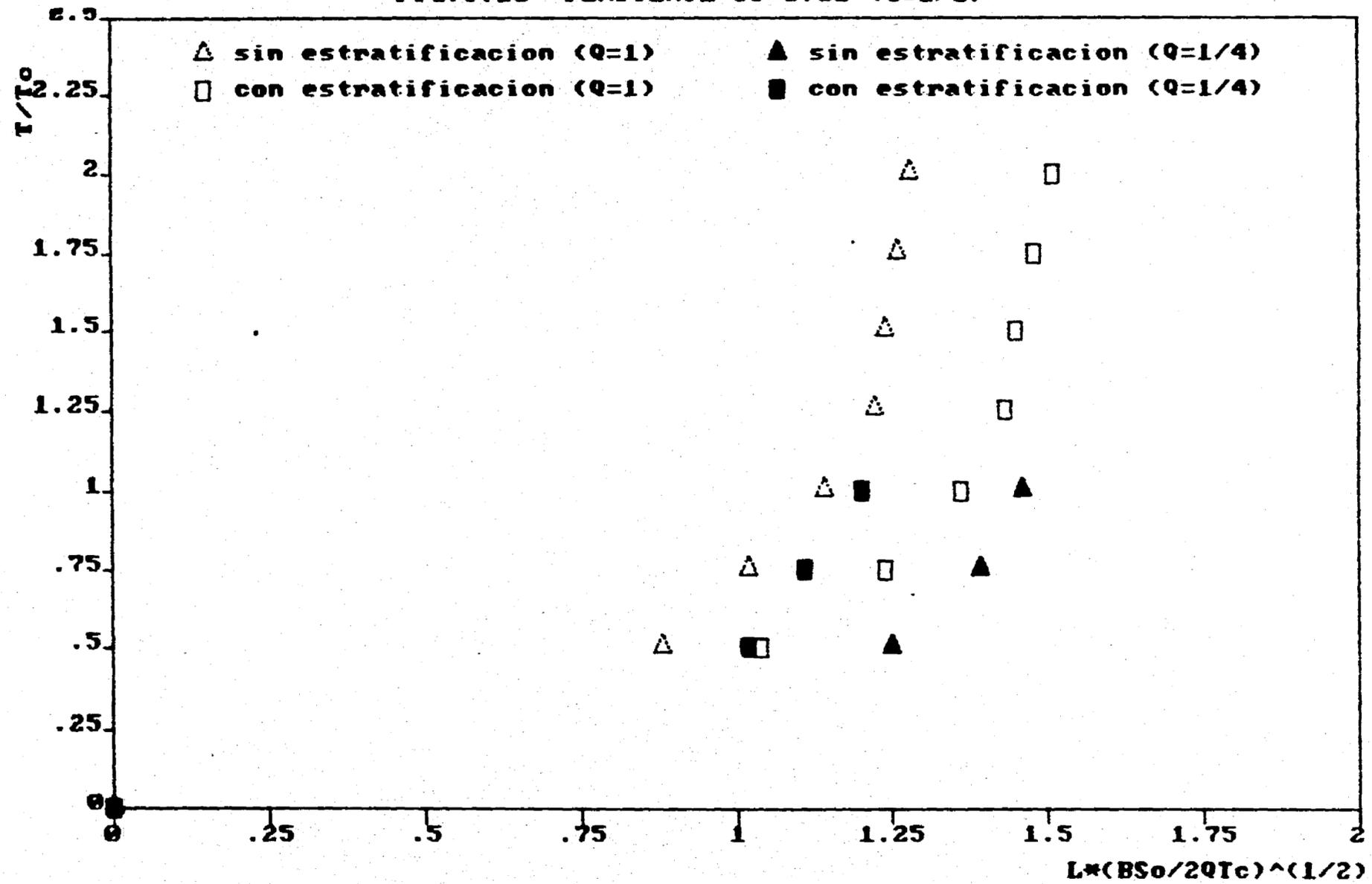


FIG.5.11 PENDIENTE $S_o=0.02$ ($C=1$)

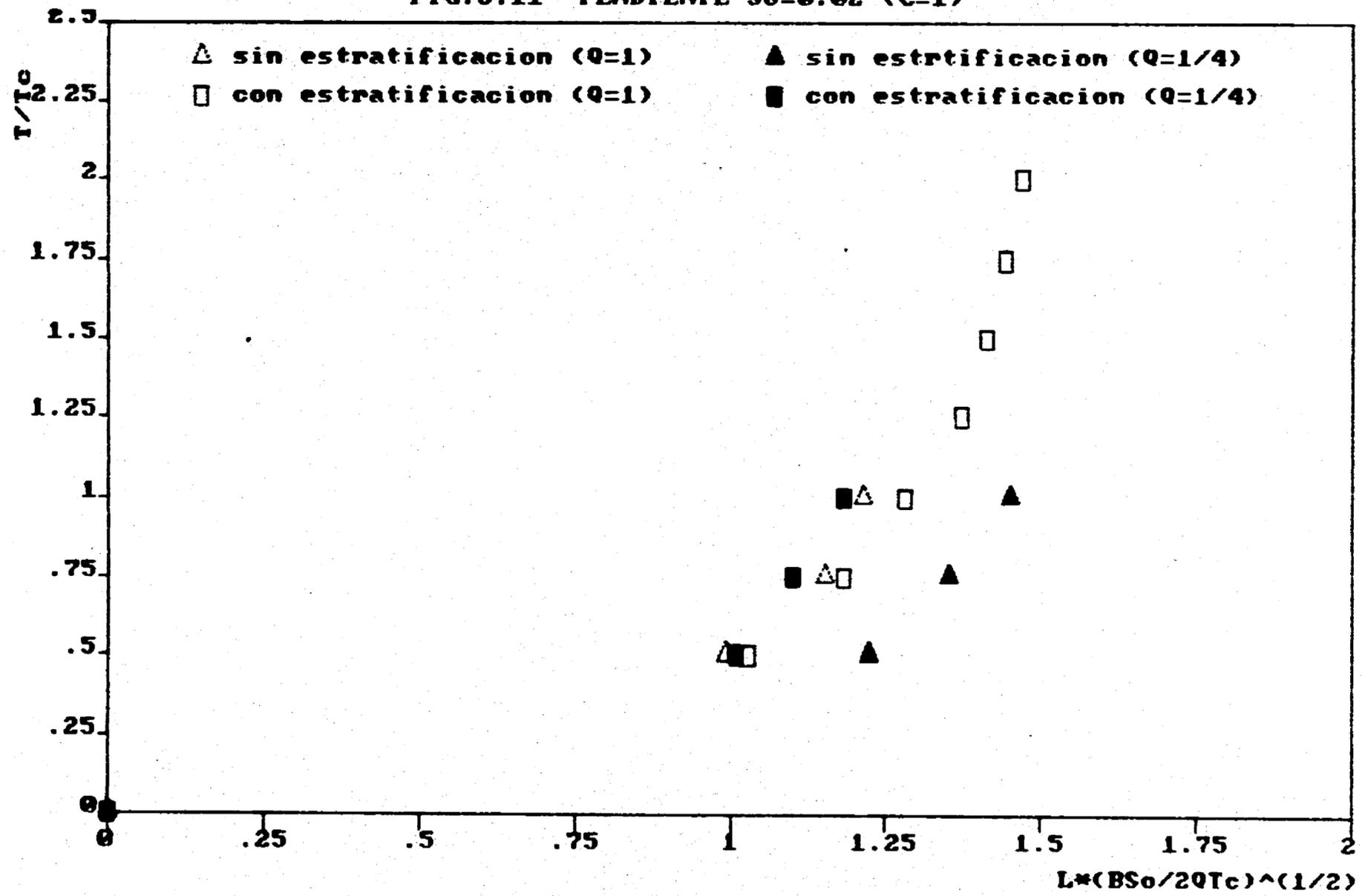
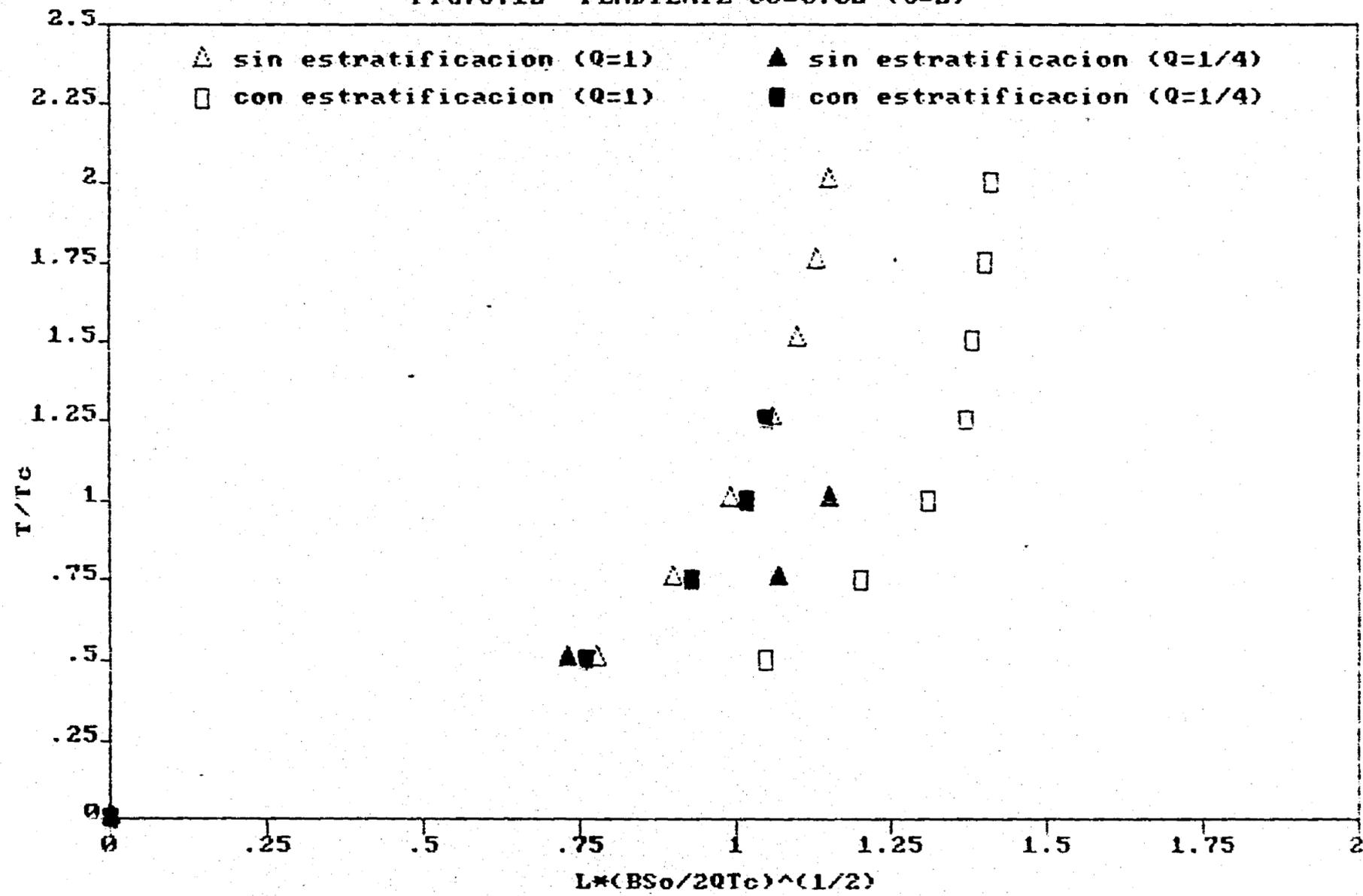


FIG.5.12 PENDIENTE $S_o=0.02$ ($C=2$)



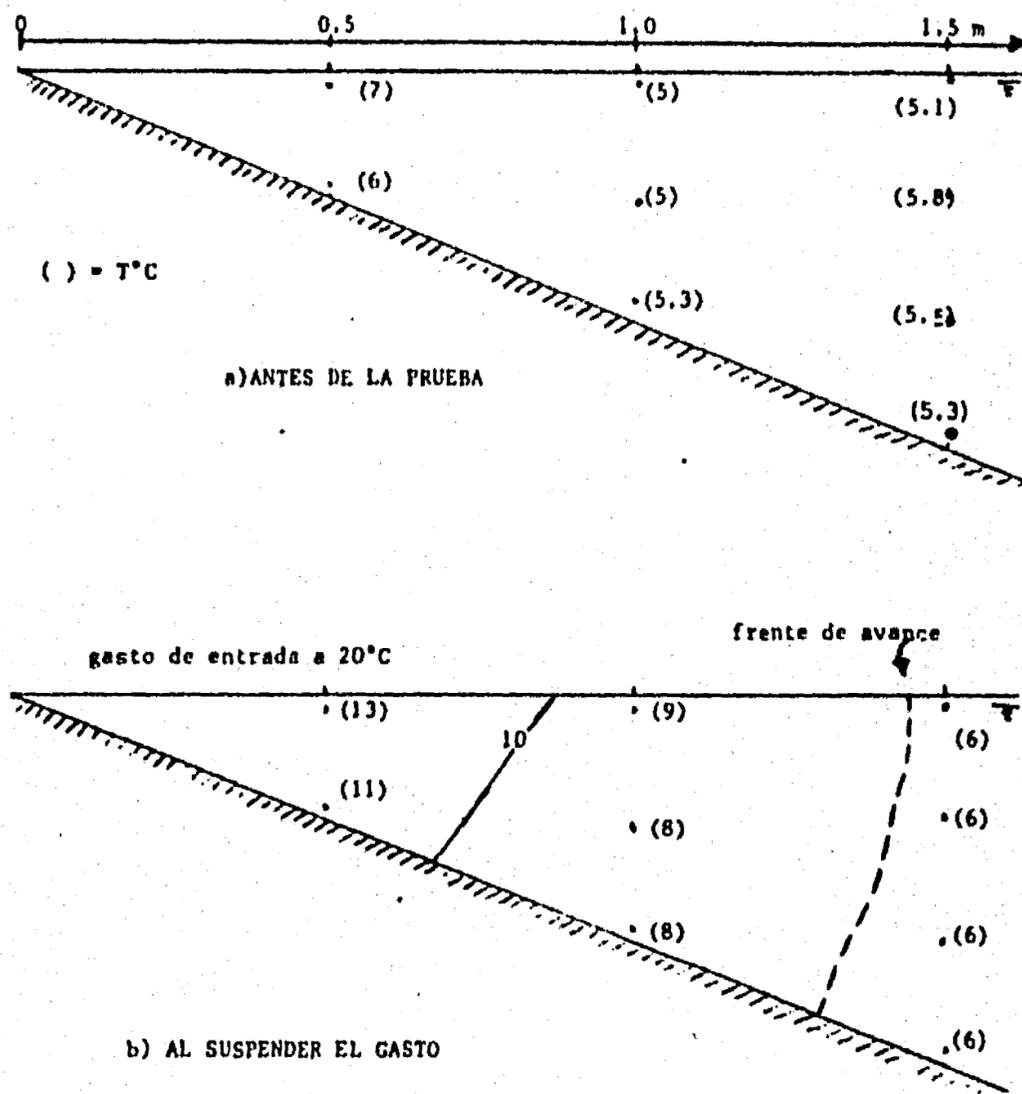


Fig. 5.13 Distribución de temperaturas en una prueba de un embalse con temperatura constante de 5°C.

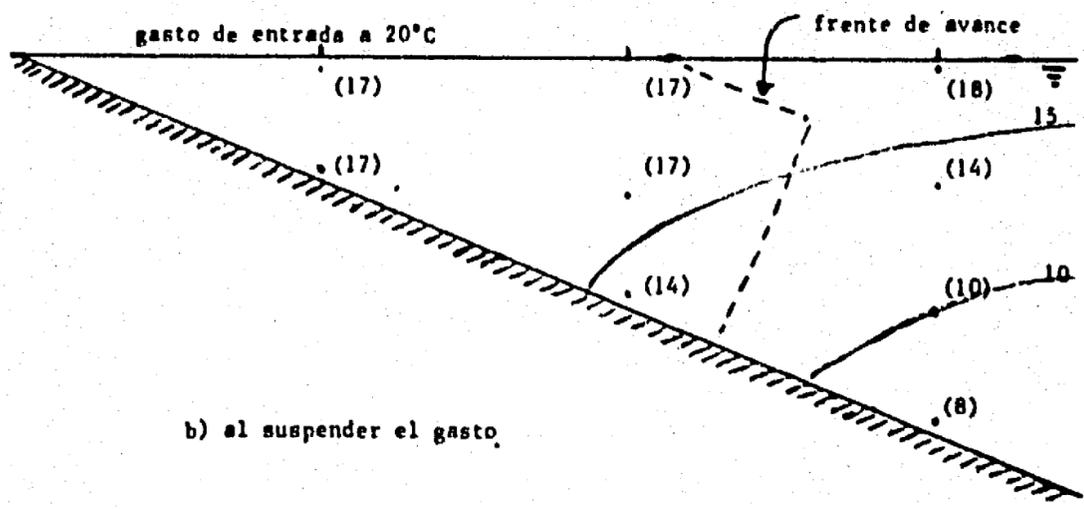
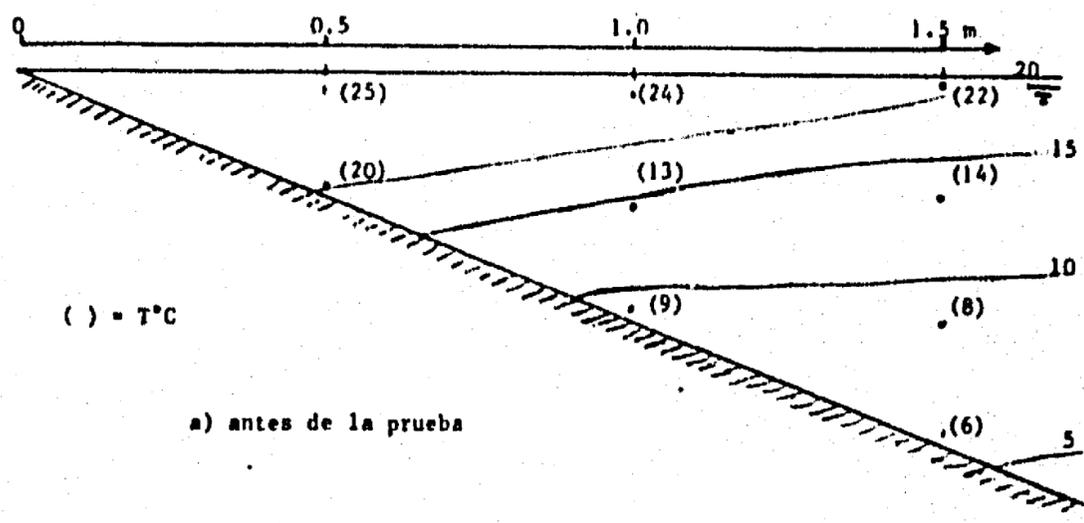


Fig. 5.14 Distribución de temperaturas en una prueba con estratificación 5-20°C.

resultados de dos pruebas que se considera son ejemplos típicos en cuanto a la distribución de temperaturas antes y después de una prueba.

e) En las doce pruebas realizadas, las curvas de avance son muy similares. Los tirantes promedio de las corrientes de densidad fueron de .013m.

f) La temperatura promedio en la zona de mezclado (inmersión), es aproximadamente el 40% del promedio de temperaturas del agua almacenada y la entrante.

g) Cuando la temperatura del agua embalsada era de 5°C (constante), la penetración de las corrientes (cuando se alcanzaban a formar) ocurría por la parte superior del agua almacenada.

h) Cuando la estratificación era de 5-20°C, la penetración ocurría por una zona intermedia y en la mayor parte de los casos sucedía donde la temperatura era de aproximadamente 15°C. En la figura 5.15 se reproduce el avance de una corriente intermedia típica.

i) El coeficiente de mezclado (M) al momento de aparecer la corriente y en momento de cortar el gasto son muy similares.

j) El valor de $(MY)_c$ cambia con el gasto:

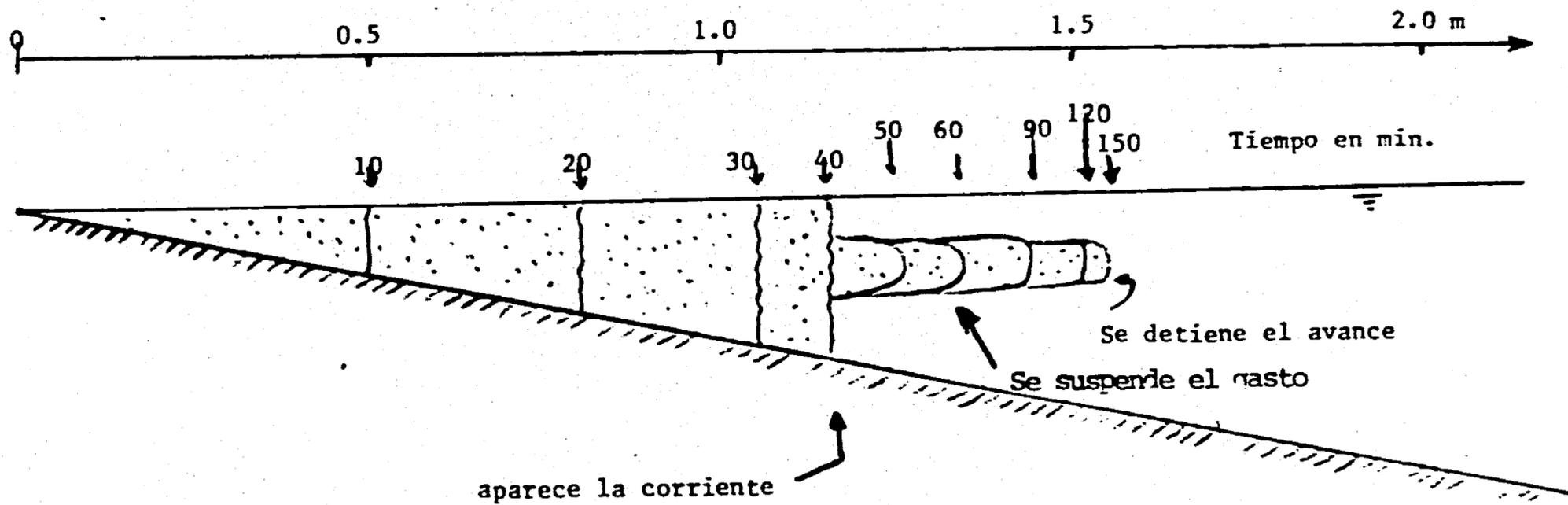


Fig. 5.15 Avance de una corriente intermedia.

Gasto	Estratificación	(MY)c
1/4	5 - 5°C	.0069
1/4	5 - 20°C	.0051
1	5 - 5°C	.0127
1	5 - 20°C	.0118

k) La longitud de la zona de inmersión fué prácticamente igual en todos los casos (1.1m). Lo mismo ocurrió con la longitud avanzada al momento del corte (1.24m).

La interpretación general que se hace de las pruebas realizadas en esta etapa, se puede sintetizar de la siguiente manera: el principal efecto de la estratificación, se manifiesta en un frenado de las corrientes de densidad. Se puede decir que es difícil que estas se formen y en caso de lograrlo, viajan distancias cortas. La zona de penetración es donde la densidad del agua embalsada es similar a la del agua entrante.

Etapa III. En esta etapa se consideró el caso de un embalse con pendiente nula, intentando determinar la influencia de la estratificación y la posición de la descarga de agua con sedimento (Figs 5.16 a 5.27).

En el apéndice A se muestra un resumen de los parámetros más

FIG. 5.16 PENDENTE HORIZONTALI (desc. sup. cacloni)

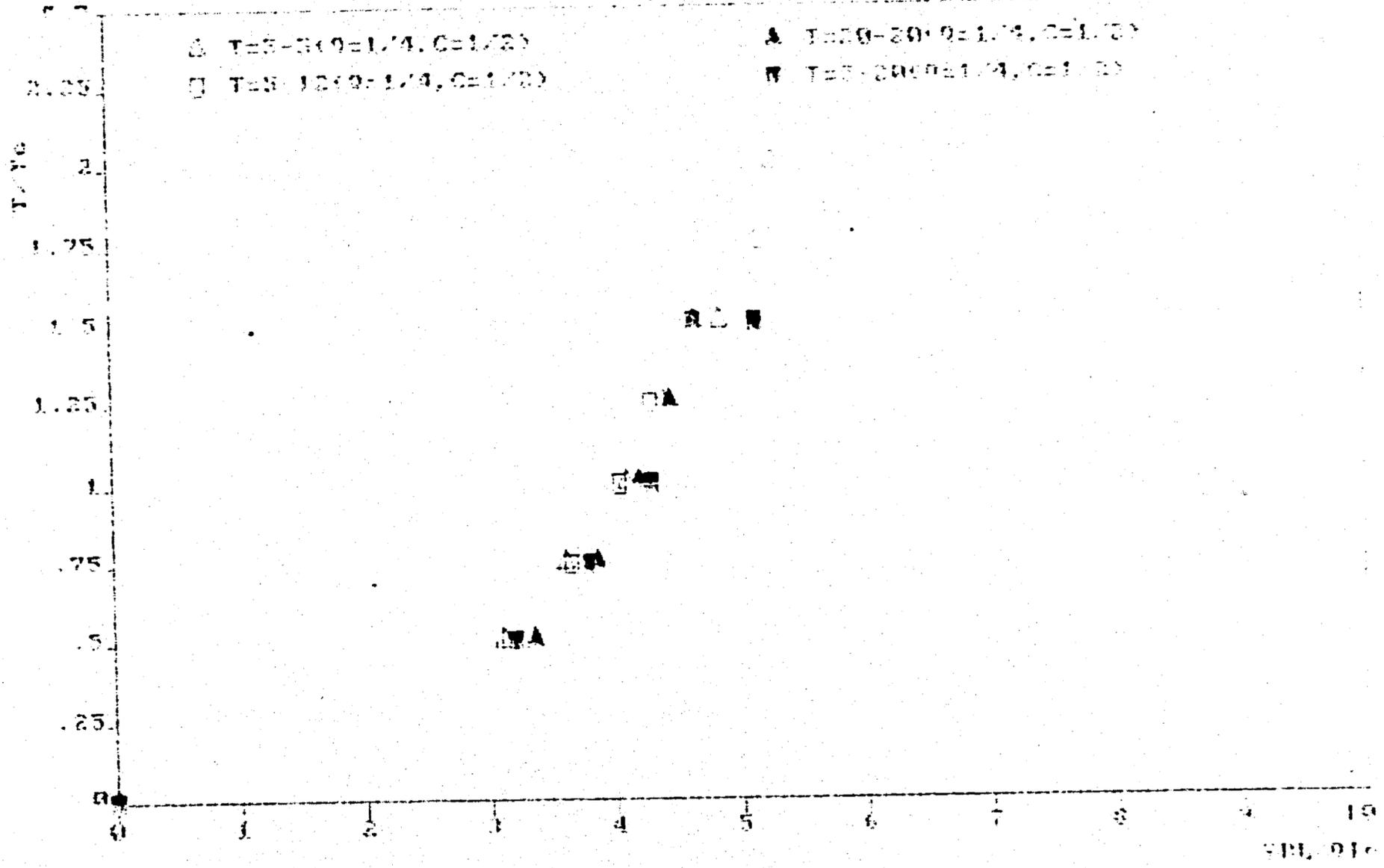


FIG. 5.17 PENDIENTE HORIZONTAL (desc. sup. cañón)

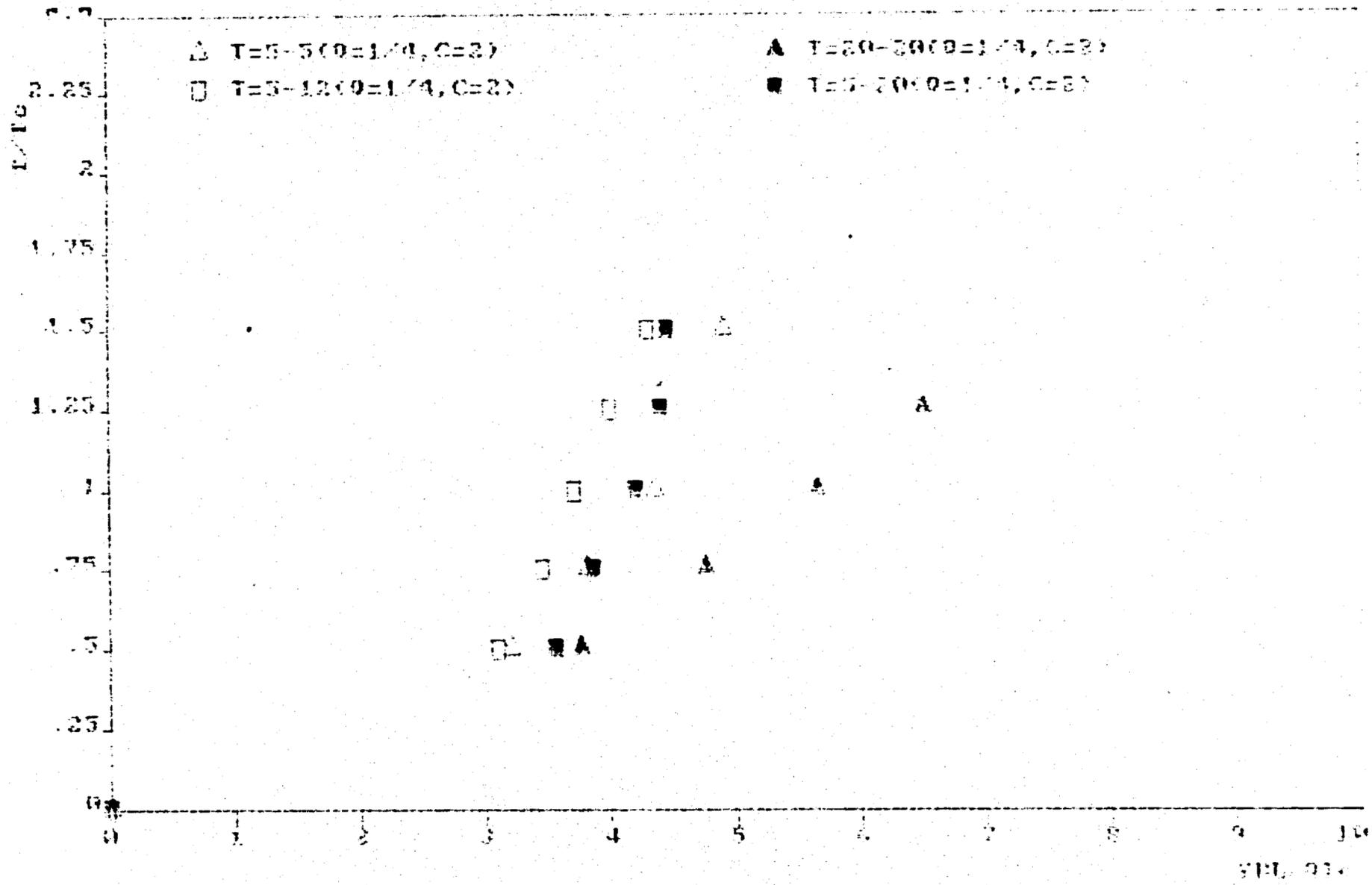
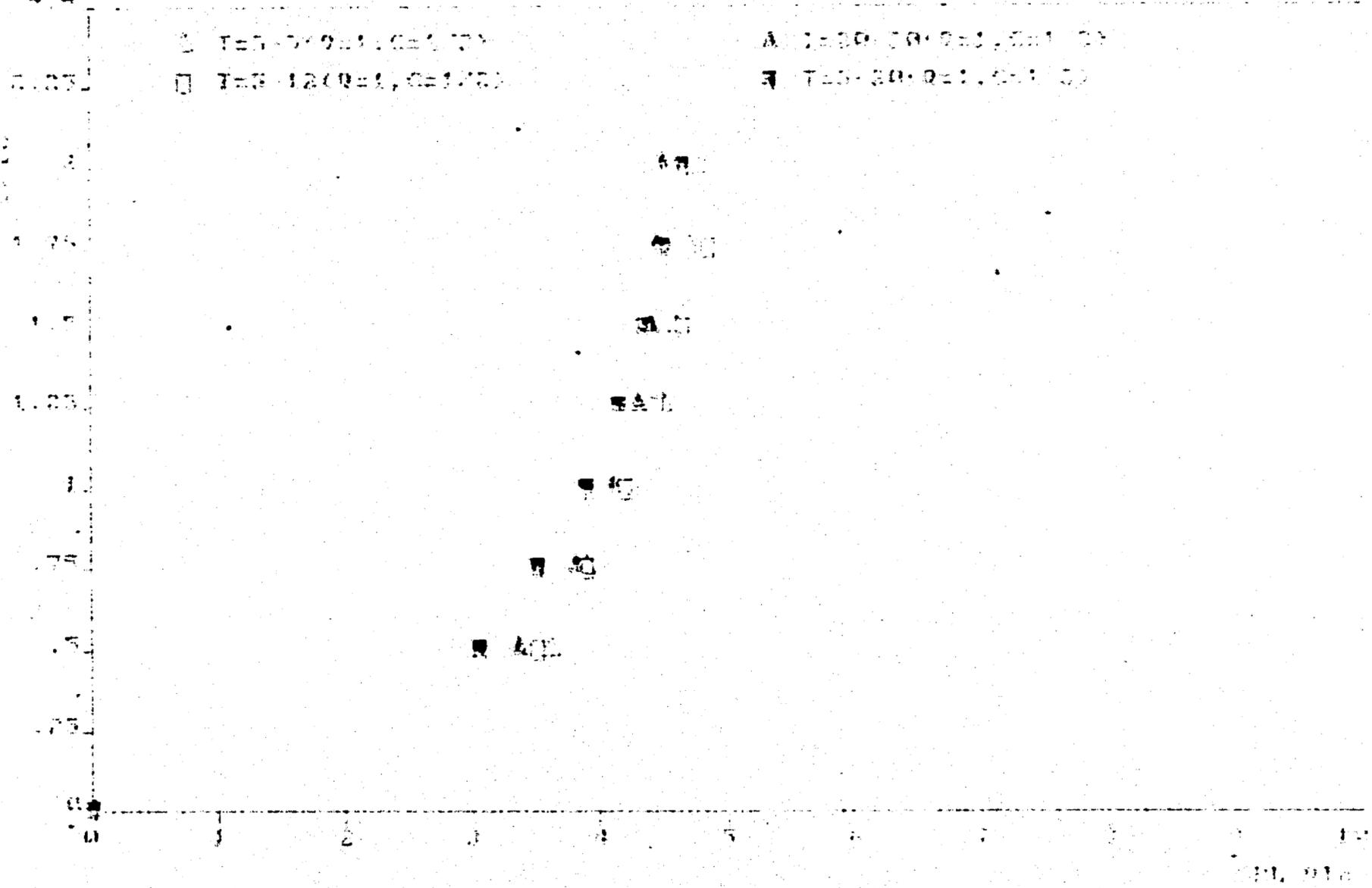


FIG. 5.19 PENDIENTE HORIZONTAL: $\mu = 0.01$



ESTD. TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

FIG. 3.12 TENDENTE HORIZONTAL (desv. sup. (mm))

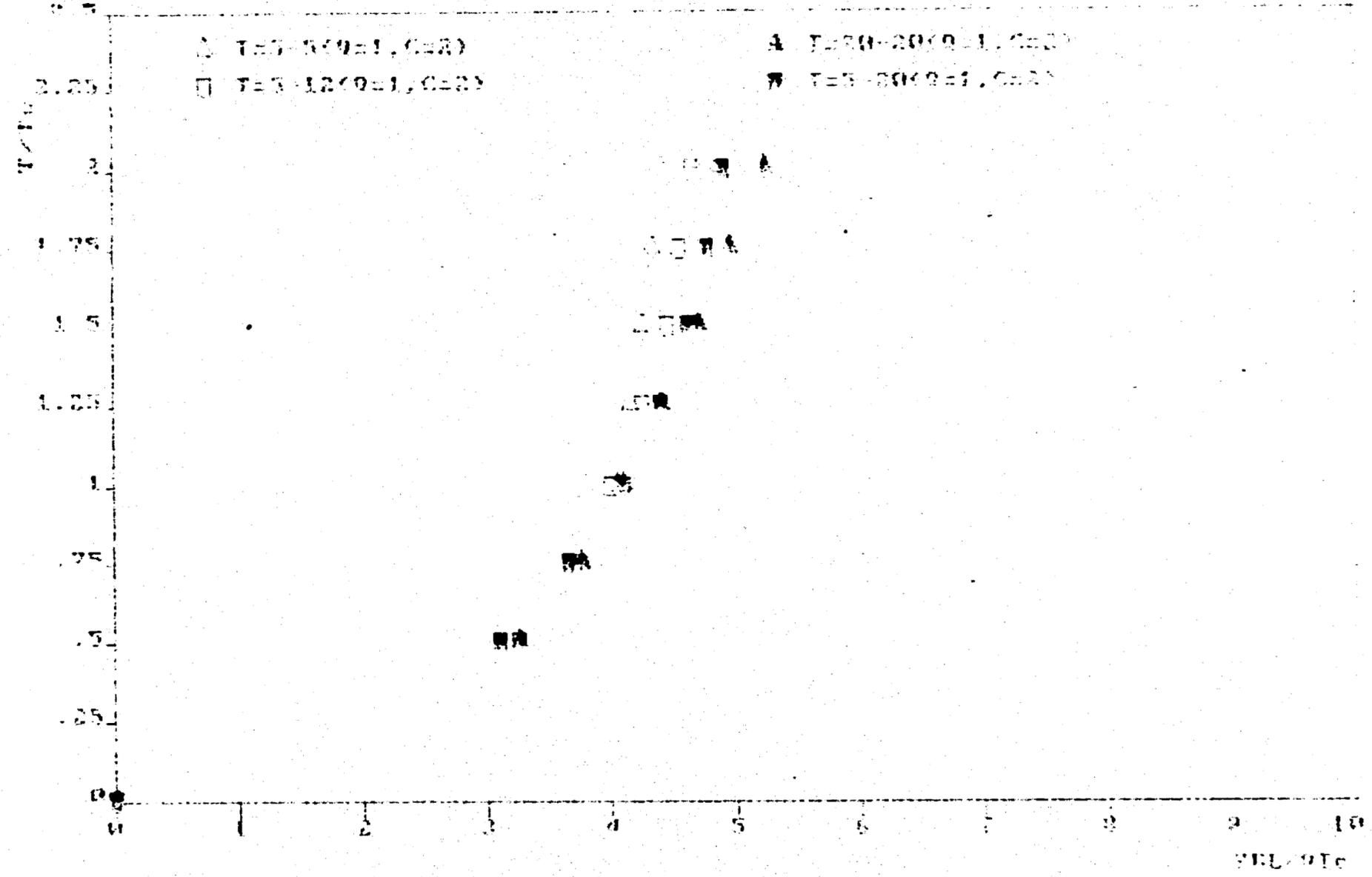


FIG. 5.20 PENDIENTE HORIZONTAL (Desc. int. caolín)

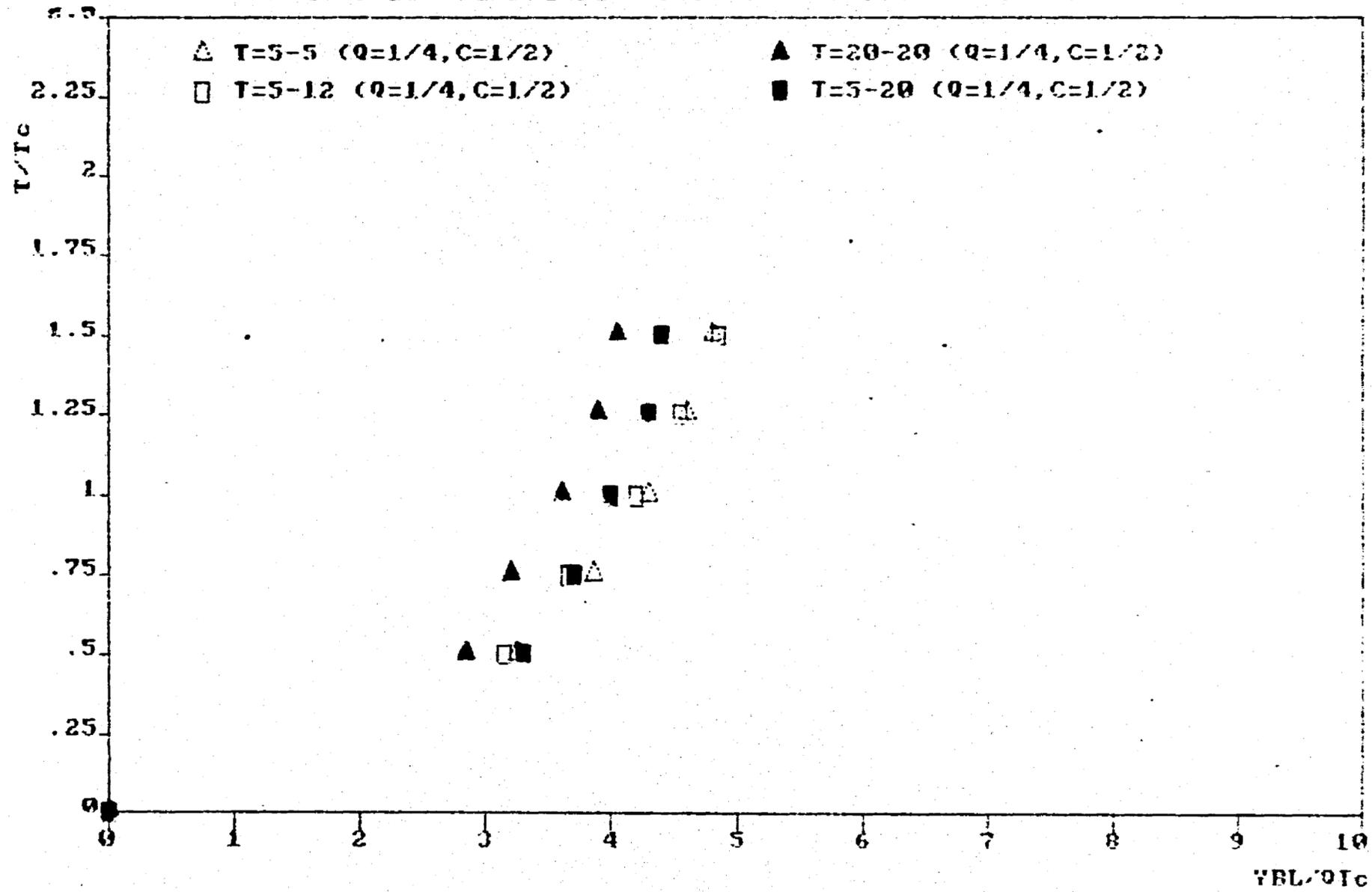


FIG. 5.21 PENDIENTE HORIZONTAL(desc.int.caolin)

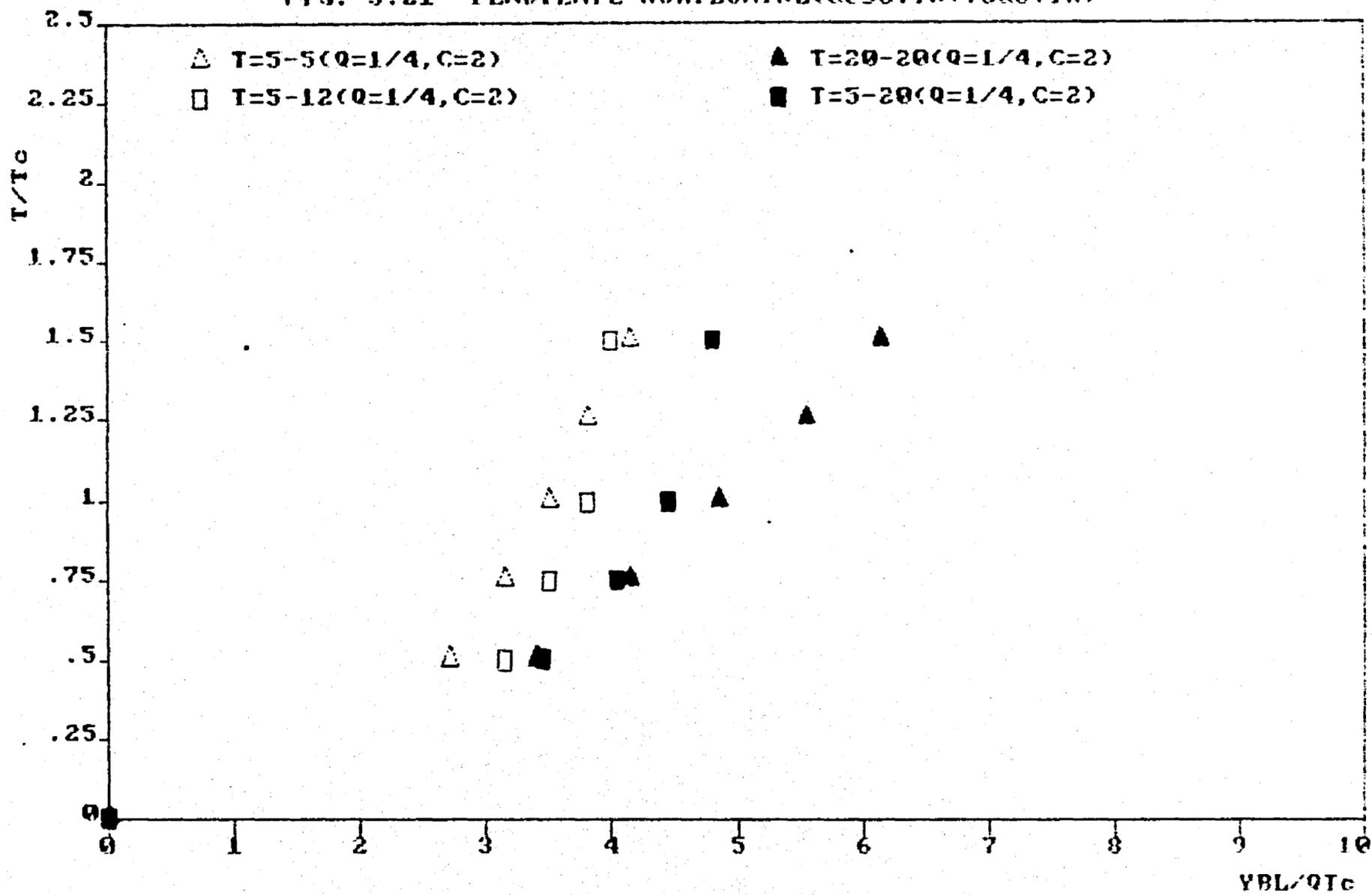


FIG. 5.22 PENDIENTE HORIZONTAL (desc. int.caolin)

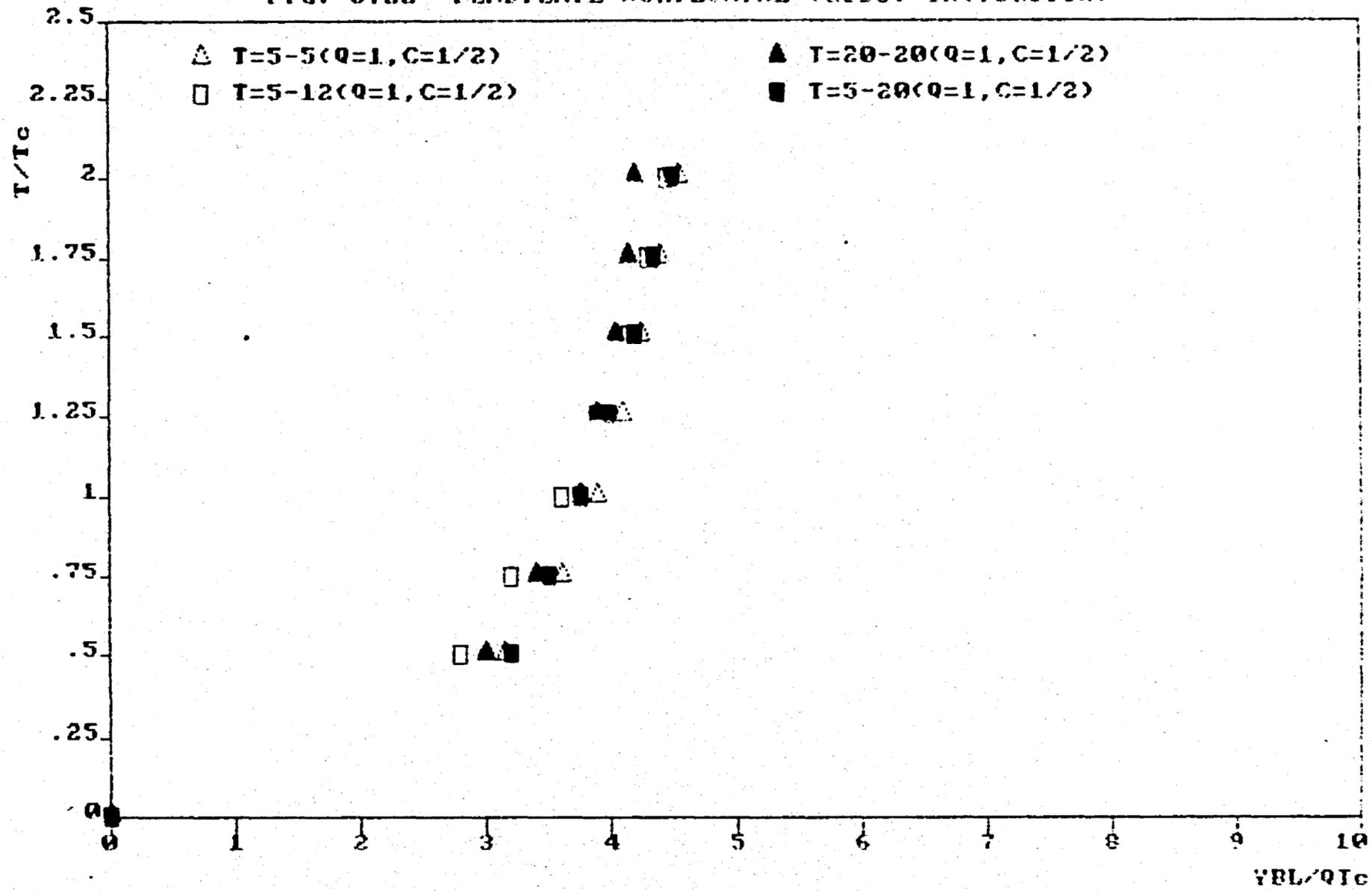


FIG. 5.23 PENDIENTE HORIZONTAL (desc. Int. cao) (m)

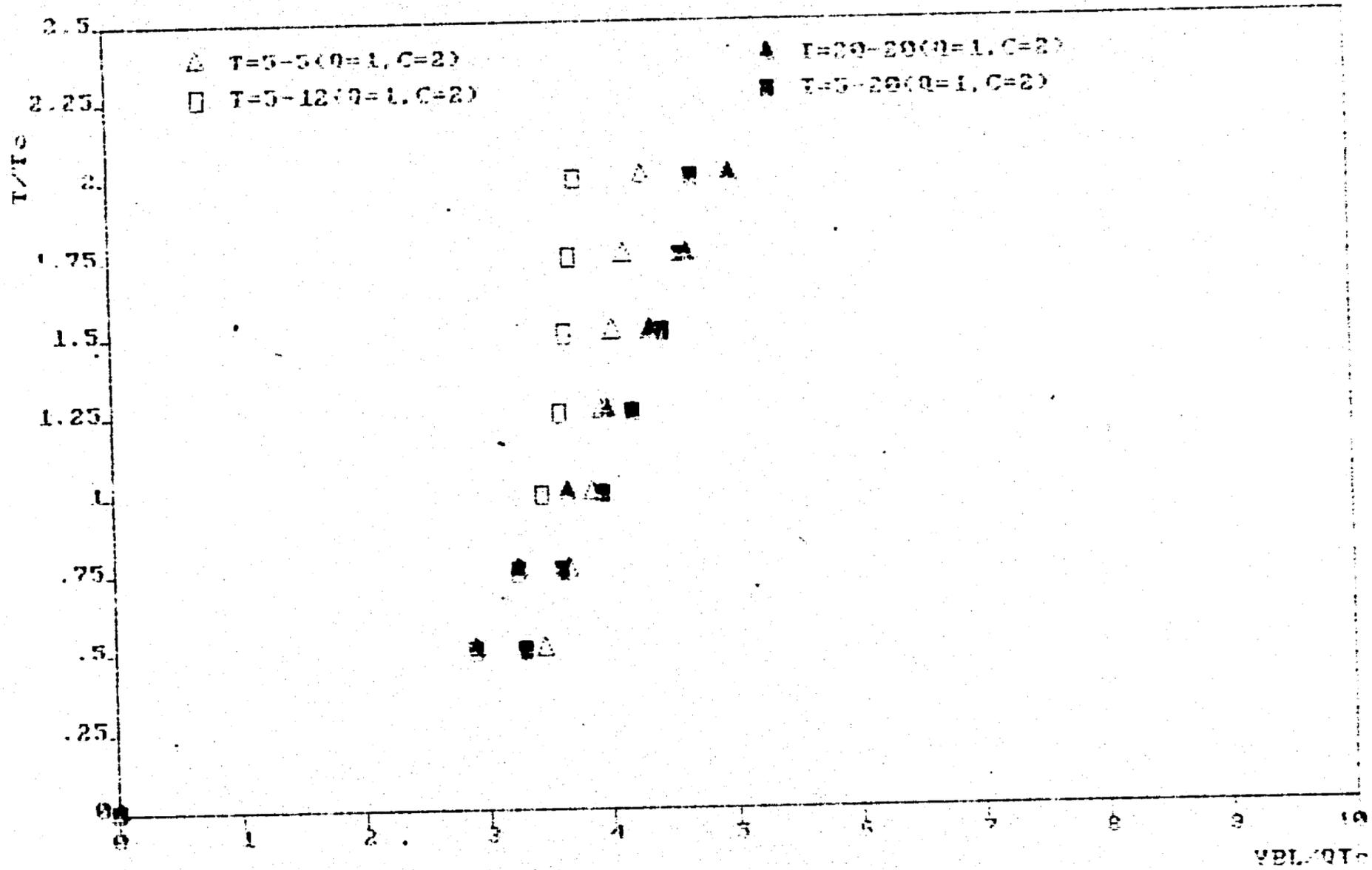


FIG. 5.24 PENDIENTE HORIZONTAL (desc. fondo caolín)

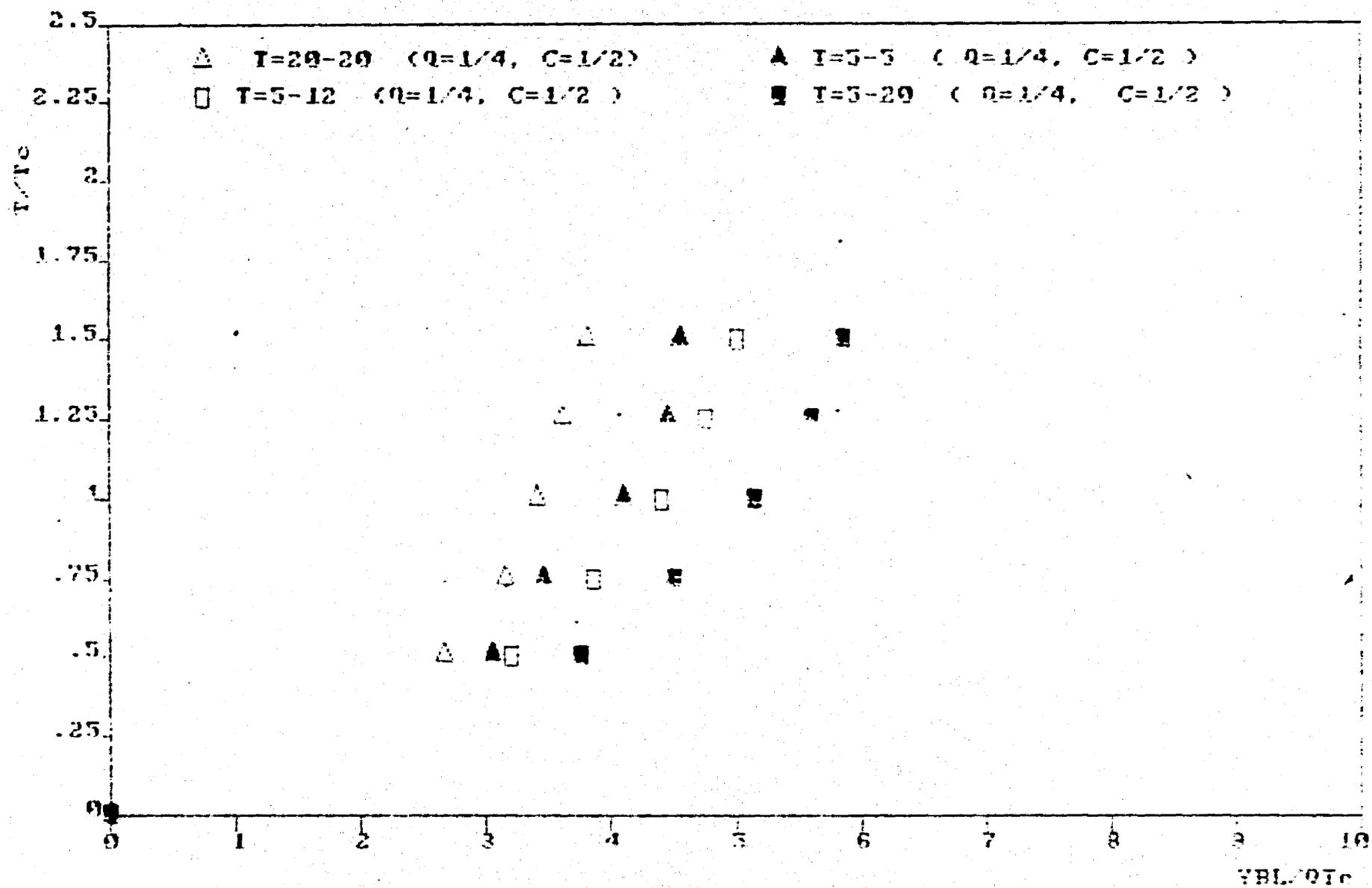


FIG. 5.25 PENDIENTE HORIZONTAL (desc. fondo, caolín)

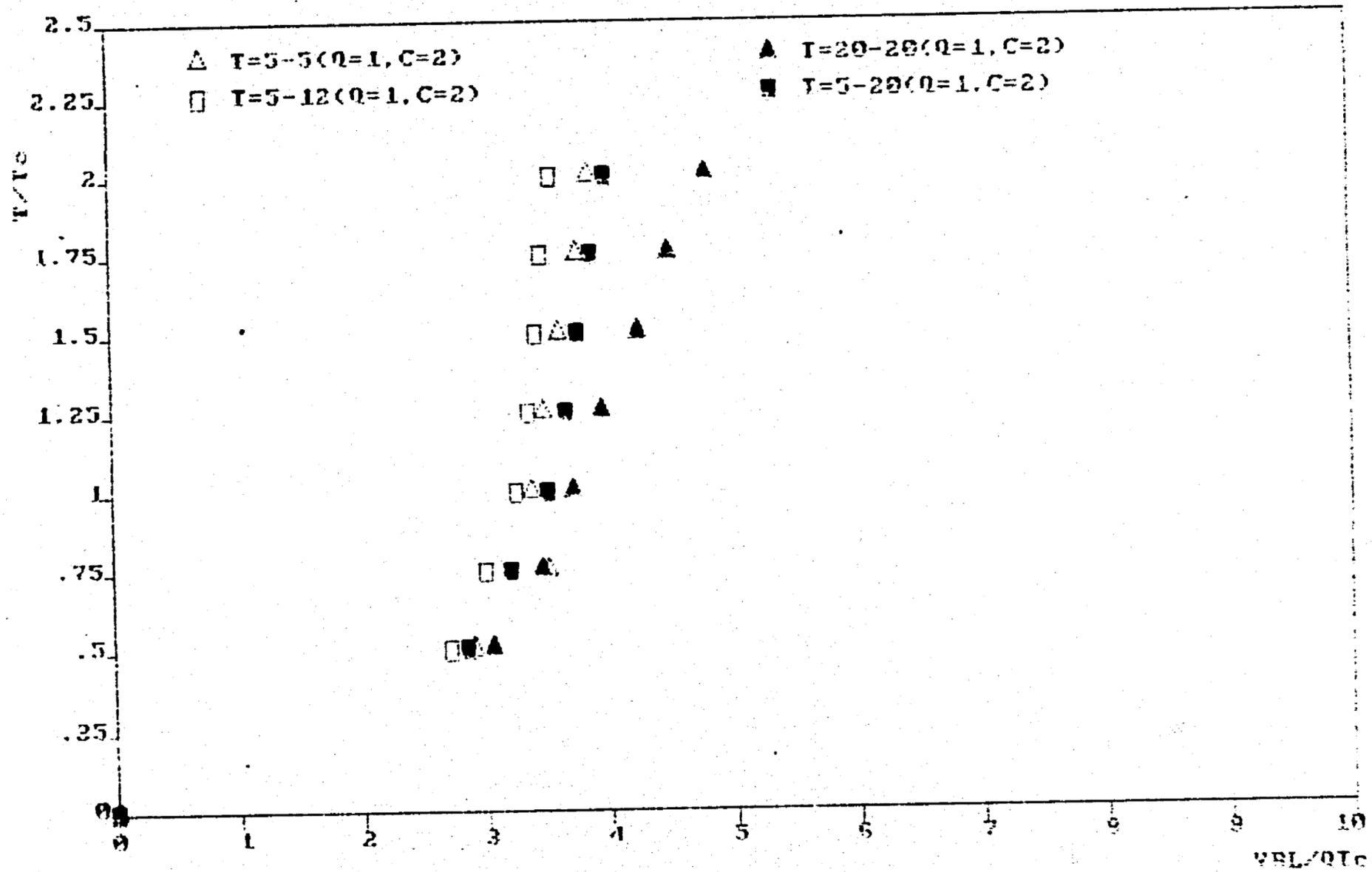


FIG. 5.26 PENDIENTE HORIZONTAL (desc.fondo,caolín)

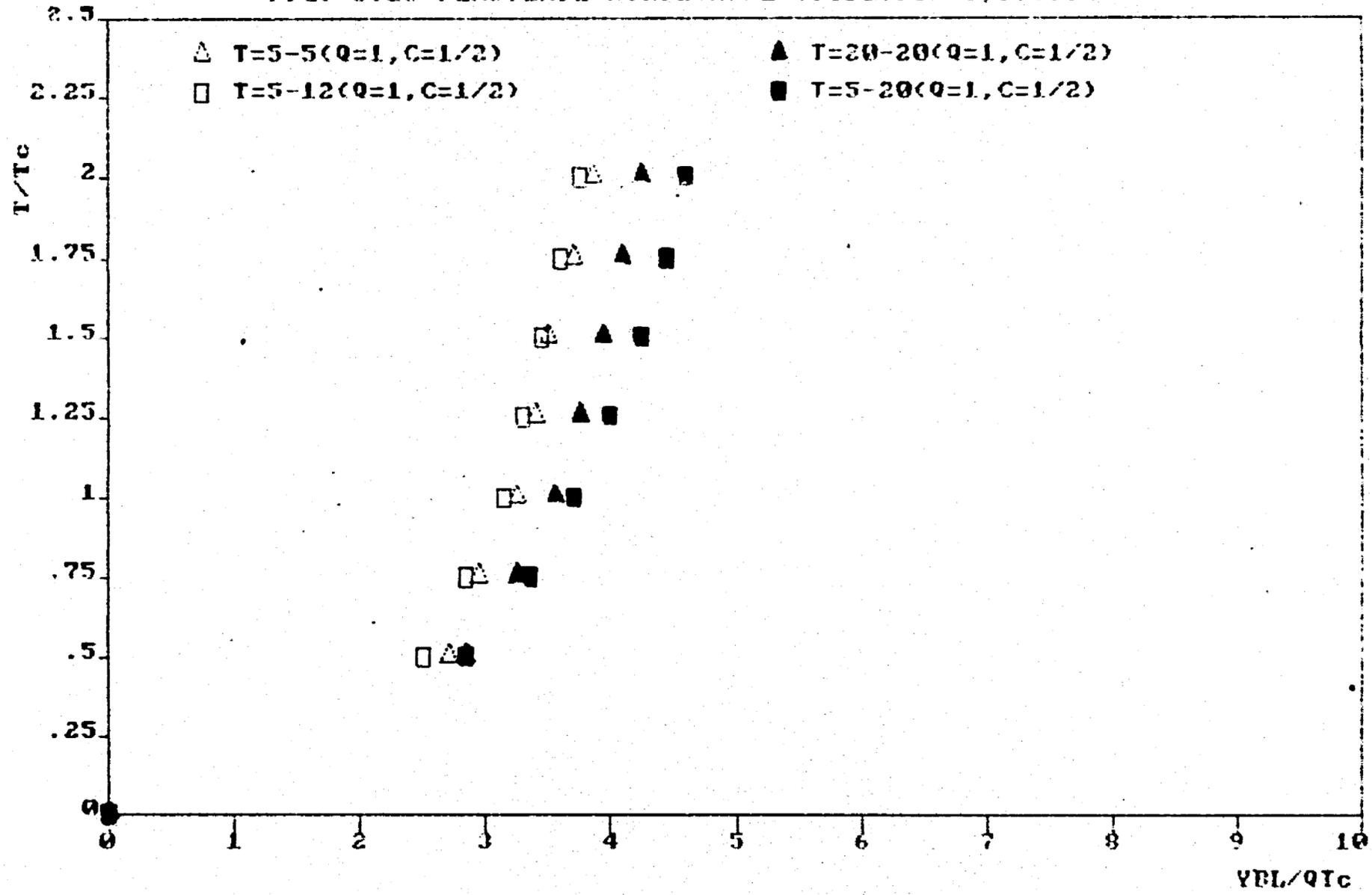
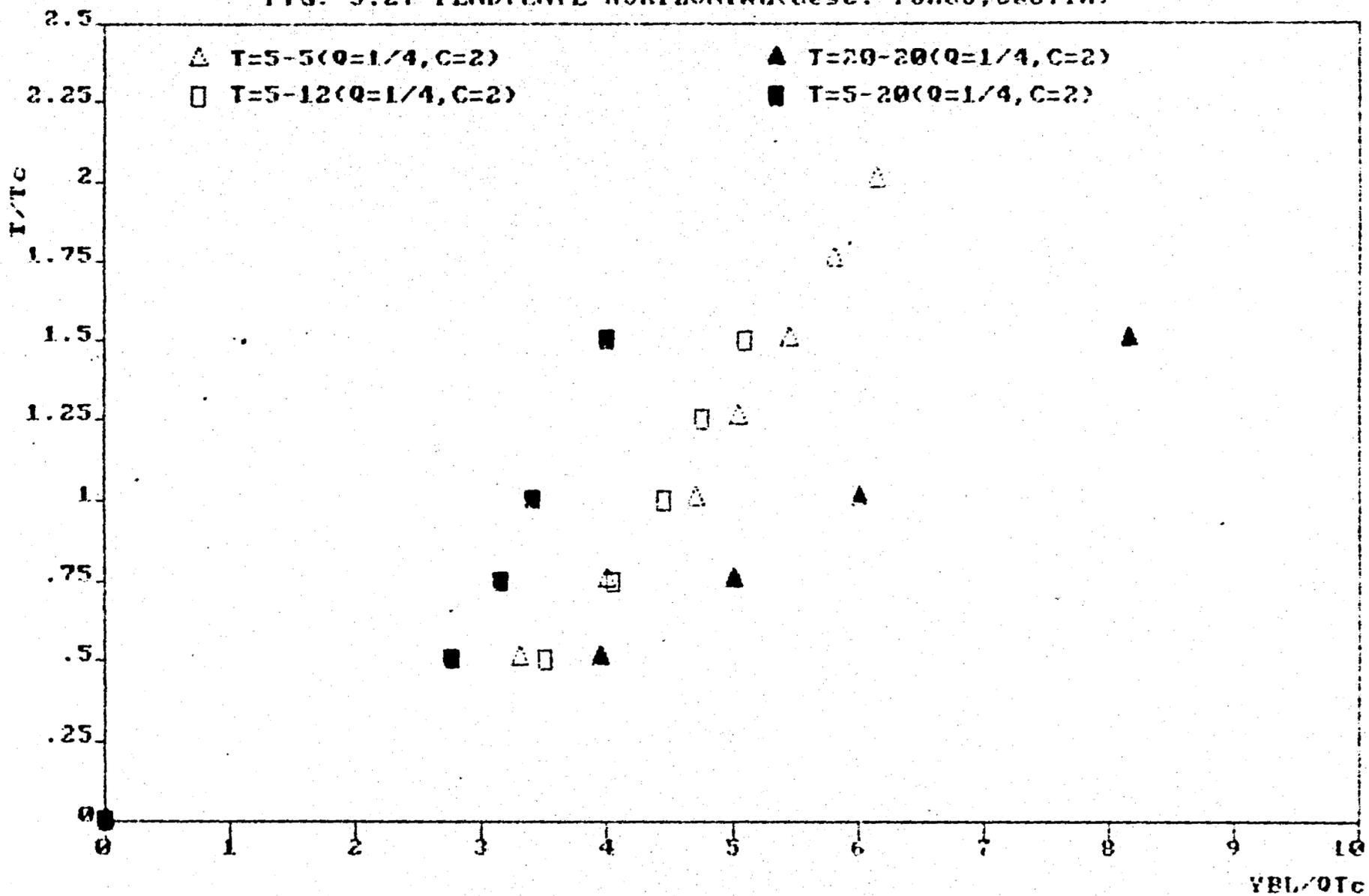


FIG. 5.27 PENDIENTE HORIZONTAL (desc. fondo, caolín)



importantes de las pruebas en esta etapa.

Los parámetros adimensionales empleados se obtuvieron de la siguiente forma.

La ecuación que representa el avance en la etapa de inmersión, según lo presentado en el capítulo 6 es la siguiente

$$L = \frac{Q t}{Y b M} \quad (6.13)$$

Dividiendo entre T_e se obtiene

$$\frac{t}{T_e} = \frac{Y b M}{Q T_e} L \quad (5.11)$$

Como se desconoce el valor de M, se puede establecer la siguiente proporción

$$\frac{t}{T_e} \propto \frac{Y b}{Q T_e} L \quad (5.12)$$

por lo cual los parámetros adimensionales son

$$A_0 = t/T_e \quad (5.13)$$

$$y \quad D_0 = \frac{Y b}{Q T_e} L$$

Las principales observaciones realizadas son las siguientes:

a) La longitud avanzada al momento del corte fué sensiblemente igual en todas las pruebas (0.8 m).

b) La longitud de la zona de inmersión no se altera por la estratificación de temperaturas, ni por la concentración de entrada, pero sí por la posición de la descarga y más por el gasto.

c) Para los gastos altos, las corrientes que se forman son pequeñas (en longitud) en comparación con la zona de inmersión (entre el 40 y 50% de dicha zona) y en gastos bajos ocurre lo contrario; se producen corrientes largas (de 1 a 2 veces la long. de la zona de inmers.). Los tirantes promedio del cuerpo de las corrientes son .025 m para $Q = 1/4$ l/min y .013 m para $Q = 1$ l/min.

d) El mezclado de la corriente (M) al momento del corte es prácticamente constante (.27) en todas las pruebas.

e) La posición de la descarga no influye en el mezclado (M).

f) El valor promedio de $(MY)_c$ es de .0053.

g) Cuando la temperatura en el embalse era constante de

5°C, y la concentración de 1/2 gr/l, las corrientes que se formaron eran superficiales, pero cuando la concentración era de 2 gr/l, eran de fondo.

h) Cuando la temperatura era constante y de 20°C, las corrientes viajaron por el fondo independientemente de la concentración.

i) Cuando había estratificación de temperaturas, las corrientes, en su gran mayoría, penetraron por alguna zona intermedia, generalmente donde la temperatura era de 10 a 12°C.

j) Las corrientes que presentaron un mayor avance fueron, consistentemente, las correspondientes a la temperatura constante de 20°C, incluso su evolución es diferente al de las otras pruebas de esta etapa. En las figs 5.21 y 5.27 se muestran las curvas de avance correspondientes, donde se observa claramente este hecho.

k) La evolución del sedimento observada en las pruebas es la siguiente. Al entrar la mezcla agua-sedimento, ésta tiende a ocupar rápidamente toda la sección transversal y avanza de esta manera hasta alcanzar una cierta longitud (zona de inmersión), momento en el cual aparece una corriente de densidad, la cual puede viajar por el fondo, la superficie o alguna por alguna zona intermedia, dependiendo

de la estratificación de temperaturas en el vaso.

Es notable en estas pruebas, que prácticamente en todos los casos, se alcanzó la misma distancia en el recorrido, independientemente de la zona donde penetraba la corriente. Esto tiene una implicación importante en el proceso de depósito, ya que significa que al producirse la sedimentación del material sólido, éste ocurrirá prácticamente en la misma zona del vaso, independientemente del gasto, temperatura y concentración.

Etapa IV. En esta etapa el objetivo fundamental era comparar el comportamiento de un tipo de material empleado en las pruebas (caolín), y de otro obtenido en un prototipo (sedimento del Balsas). En ambos casos no se empleó ningún defloculante. Los resultados obtenidos son los siguientes (figs 5.28-5.30).

a) El mezclado promedio hasta el momento en que aparece la corriente de densidad es prácticamente el mismo para ambos casos (caolín .09 y .13 mat. Balsas).

b) El mezclado promedio al suspender el gasto, también es muy similar para ambos materiales (.25 caolín, .27 mat. Balsas).

c) En los dos materiales, cuando la concentración es mayor

FIG. 3.28 PENDIENTE HORIZONTAL(desc. intermedia)

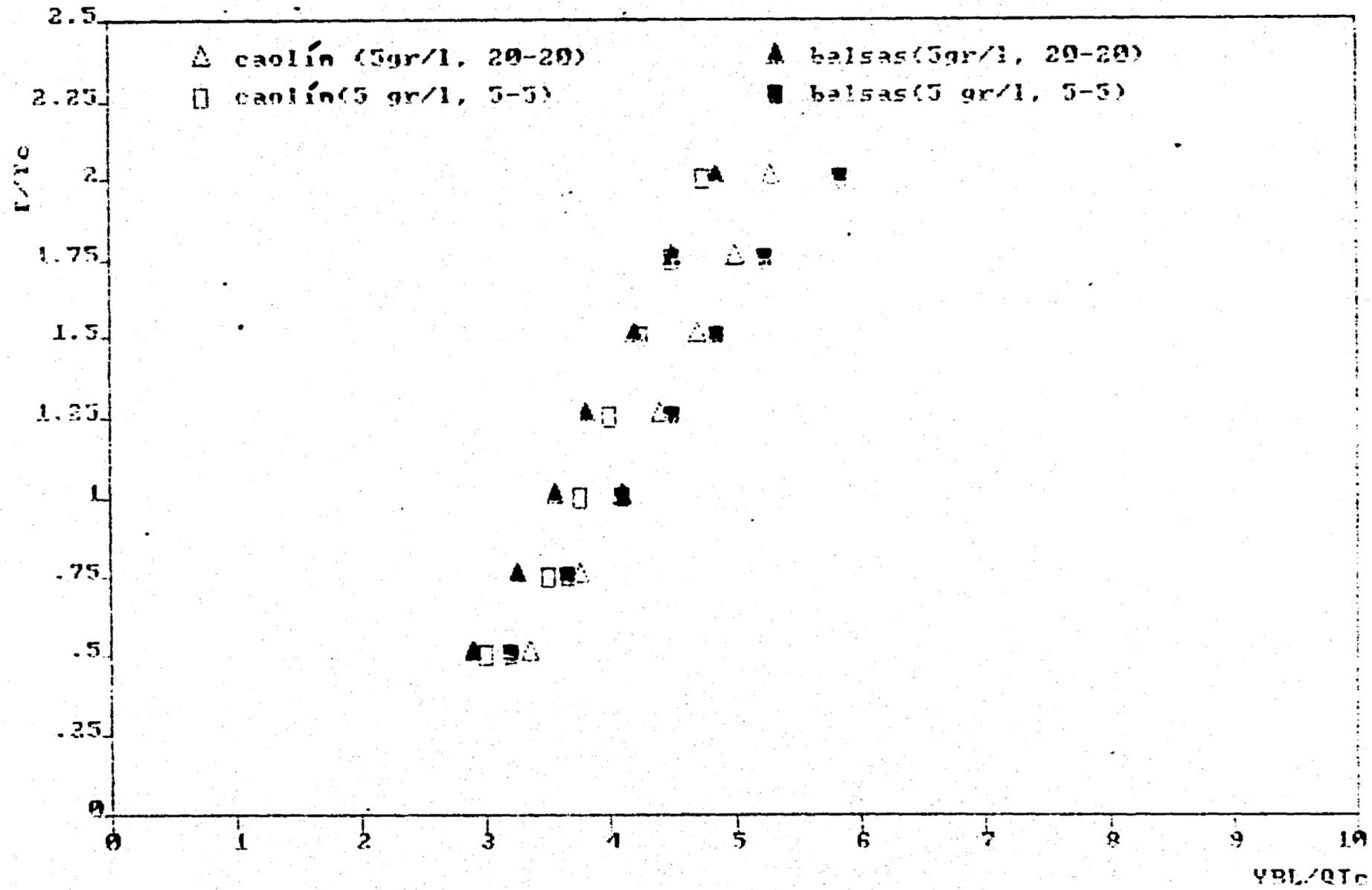


FIG. 5.29 PENDIENTE HORIZONTAL (desc. intermedia)

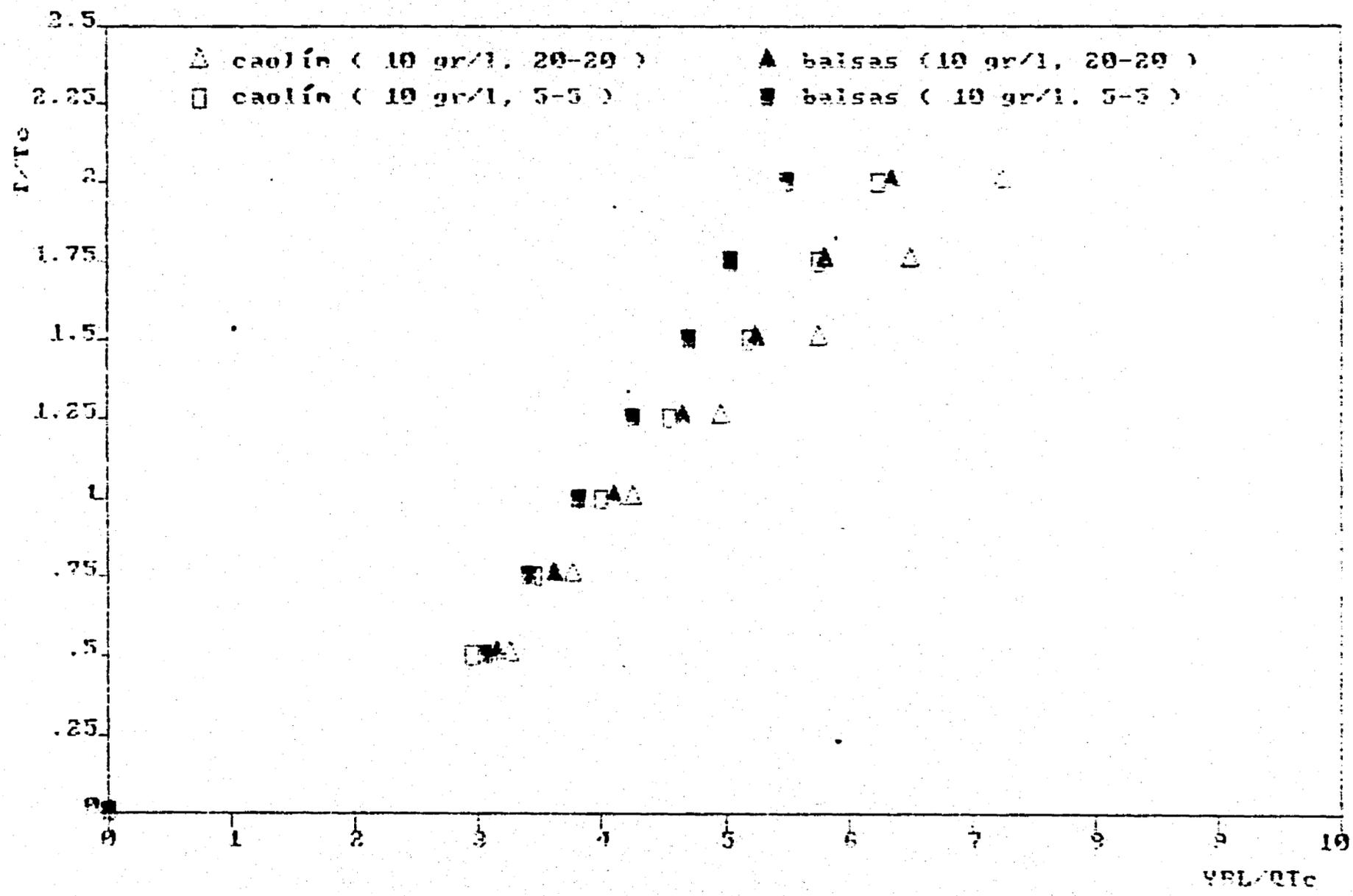
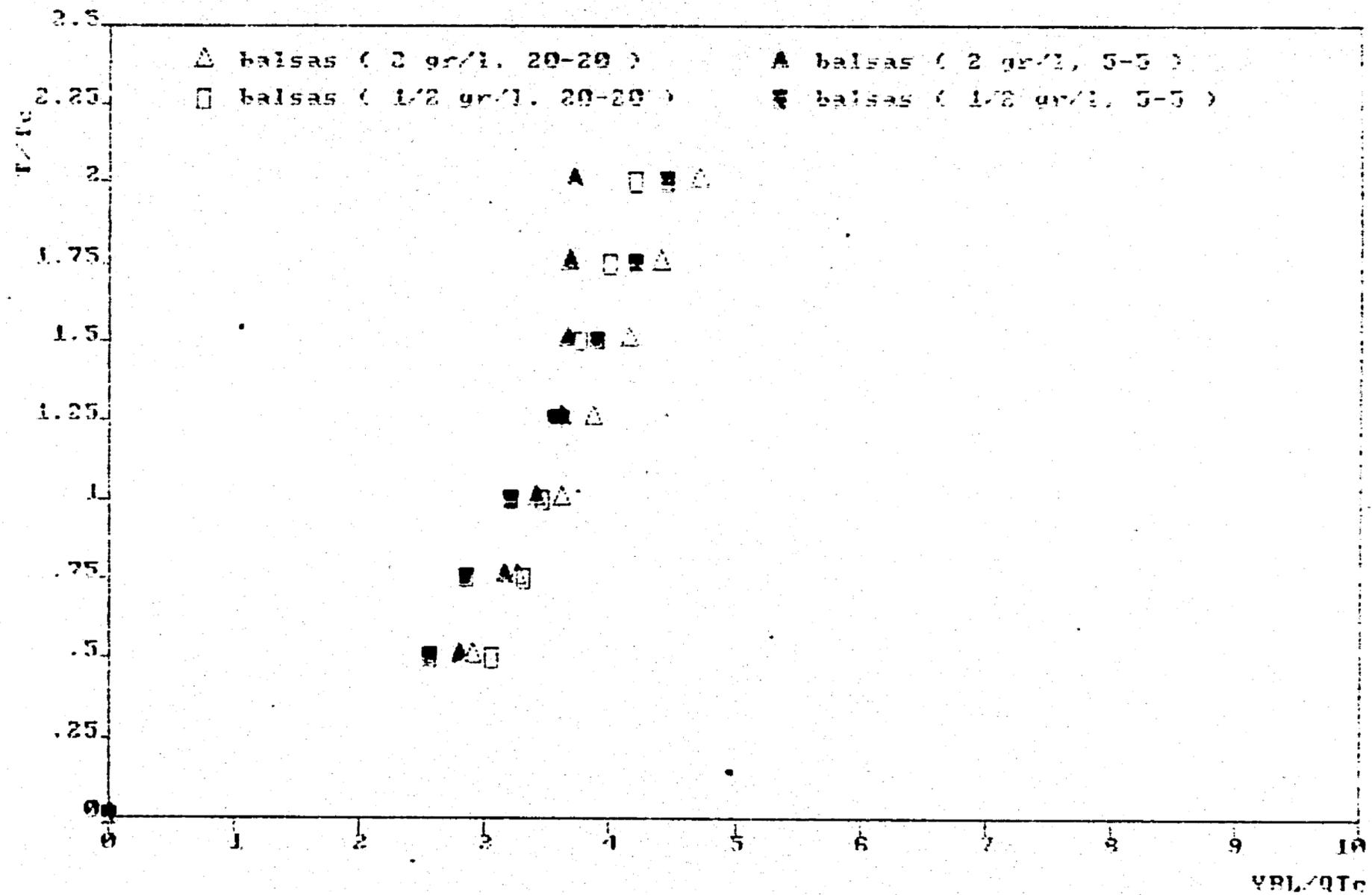


FIG. 3.20 PENDIENTE HORIZONTAL (desc. intermedia)



de 2 gr/l, las corrientes son de fondo.

d) Los valores de $(MY)_c$ son: .005 para el caolín y .007 para el mat. Balsas.

En resumen, el comportamiento de ambos materiales es muy similar, a pesar de ser dos materiales bastante diferentes en su origen y características (ver apéndice B).

Independientemente de la gran similitud en el comportamiento de ambos materiales, conviene observar otros aspectos importantes.

a) Las corrientes avanzan la misma longitud al momento de cortar el gasto, independientemente de la concentración de entrada, la cual se varió de 1/2 a 10 gr/l. El avance promedio fué, desde el origen, de 0.79m. El tirante promedio de las corrientes de densidad fué de .025 m.

b) Con concentraciones bajas, la zona de inmersión tiende a ser la parte más importante de la longitud total recorrida.

Etapa V. Se recordará de acuerdo a lo planteado en el capítulo 3, que se deseaba determinar el comportamiento del sedimento en un canal cuyo eje longitudinal no era recto, sino que tenía curvas. Para ello se propuso emplear las condiciones de la etapa I, correspondientes a la pendiente

de .02. En términos generales, el comportamiento es similar al mecanismo descrito en dicha etapa, aunque existe una diferencia importante en el mezclado, pues mientras en la primera etapa, se obtuvo un valor de $M = 0.6$, en esta etapa fué de 0.9. En otras palabras, el principal efecto de las curvas es que retarda el avance de la corriente, produciendo un menor mezclado del agua entrante con la embalsada.

En las figs. 5.31-5.33, se muestra el avance de estas corrientes, empleando los parámetros adimensionales A_1 y D_1

Las principales observaciones son las siguientes:

a) Los parámetros adimensionales explican bien el comportamiento de las corrientes de esta etapa.

b) Para la concentración de entrada más baja se tiene el menor avance. Para las restantes el comportamiento es independiente de la concentración. El tirante promedio de las corrientes fué de .013m.

c) El comportamiento del sedimento es similar al obtenido en las pruebas de la etapa I.

FIG. 5.31 CANAL CURVO (caolin, $S_o=0.02$)

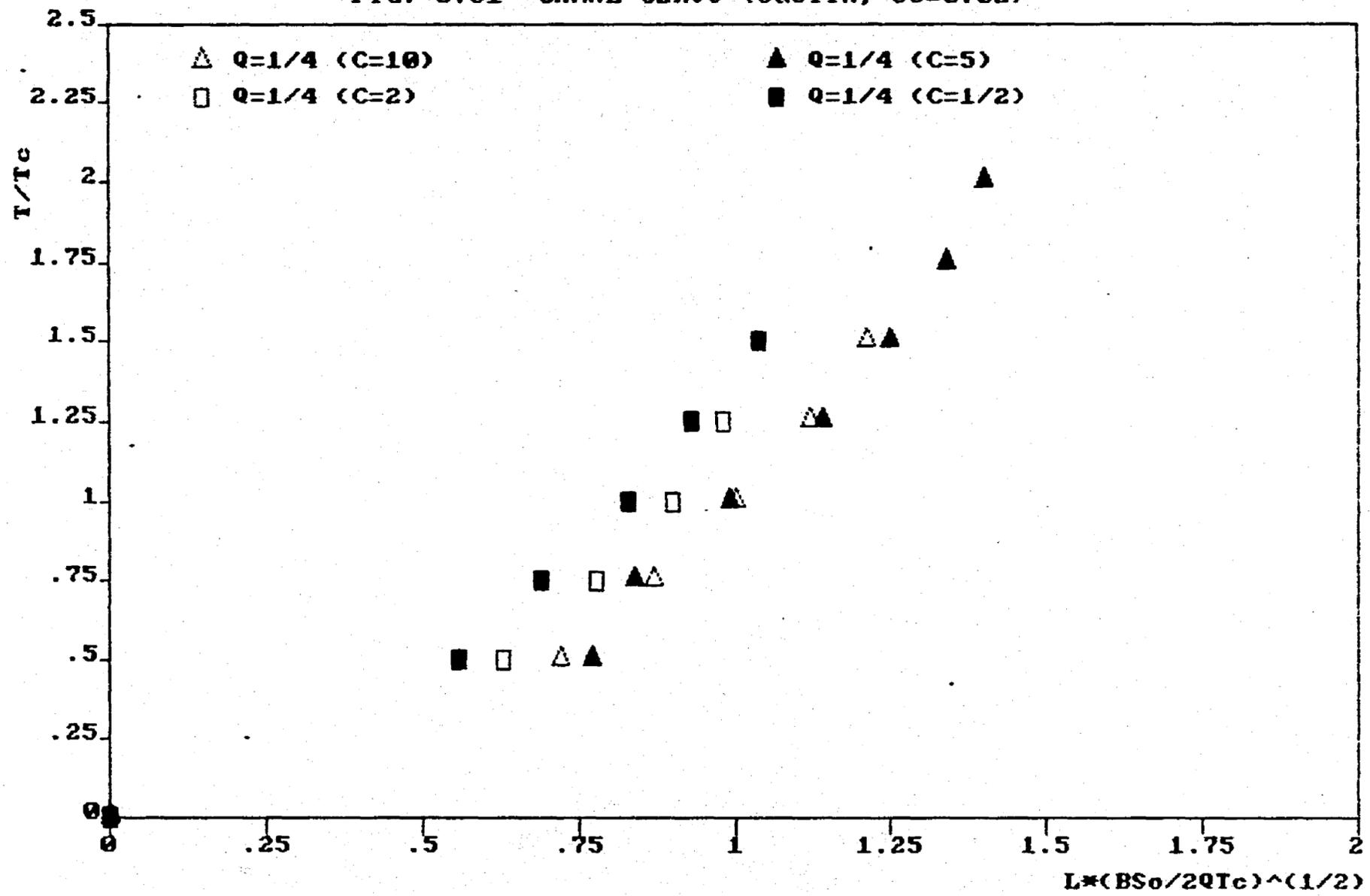


FIG. 5.32 CANAL CURVO (caolin, $S_o=0.02$)

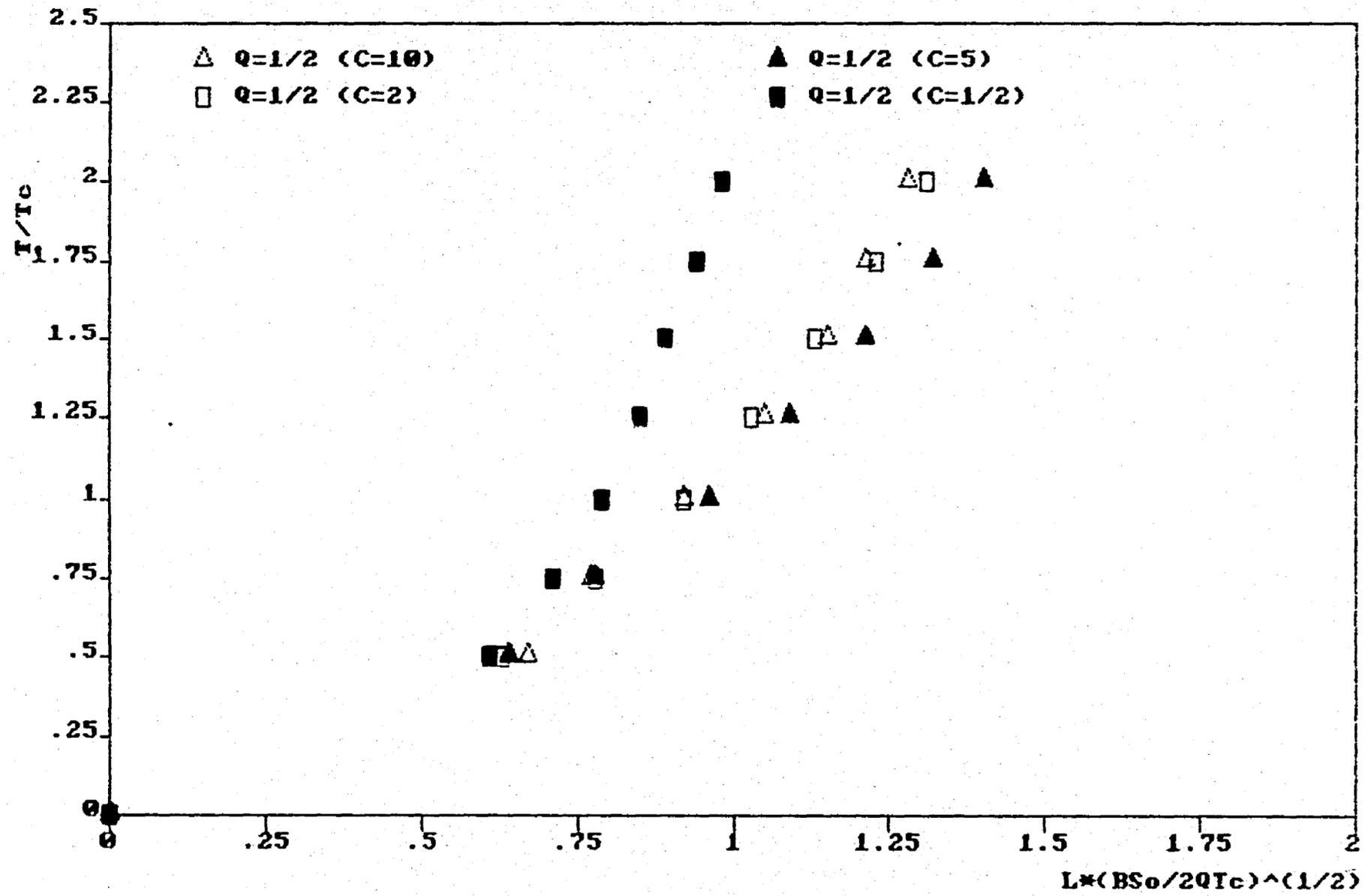
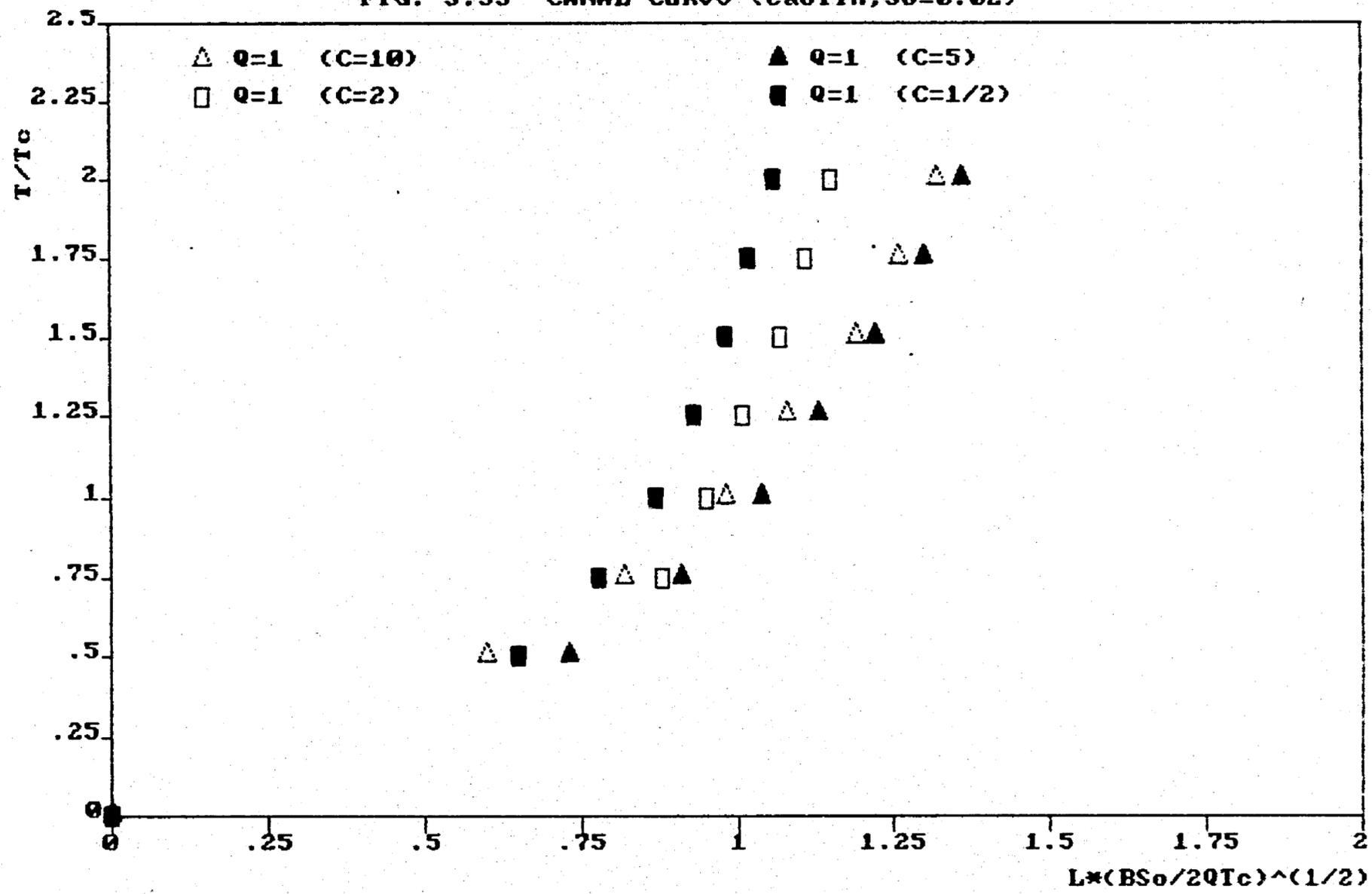


FIG. 5.33 CANAL CURVO (caolin, $S_o=0.02$)



6.-PROPOSICION TEORICA DEL PROBLEMA

En este capítulo se presenta una interpretación teórica del problema. Se proponen las principales hipótesis obtenidas del trabajo experimental y se plantean las ecuaciones fundamentales.

DESCRIPCION GENERAL DEL FENOMENO

Al penetrar una corriente a un embalse, el material grueso se depositará en la entrada del vaso, en tanto que el material "fino", continuará viajando en suspensión dentro del agua almacenada (fig 6.1), hasta alcanzar una cierta distancia que en la literatura se denomina zona de inmersión, donde ocurre un mezclado de la corriente entrante; luego aparece una corriente de densidad que viaja por el fondo y que en algunos casos puede llegar hasta la cortina del embalse.

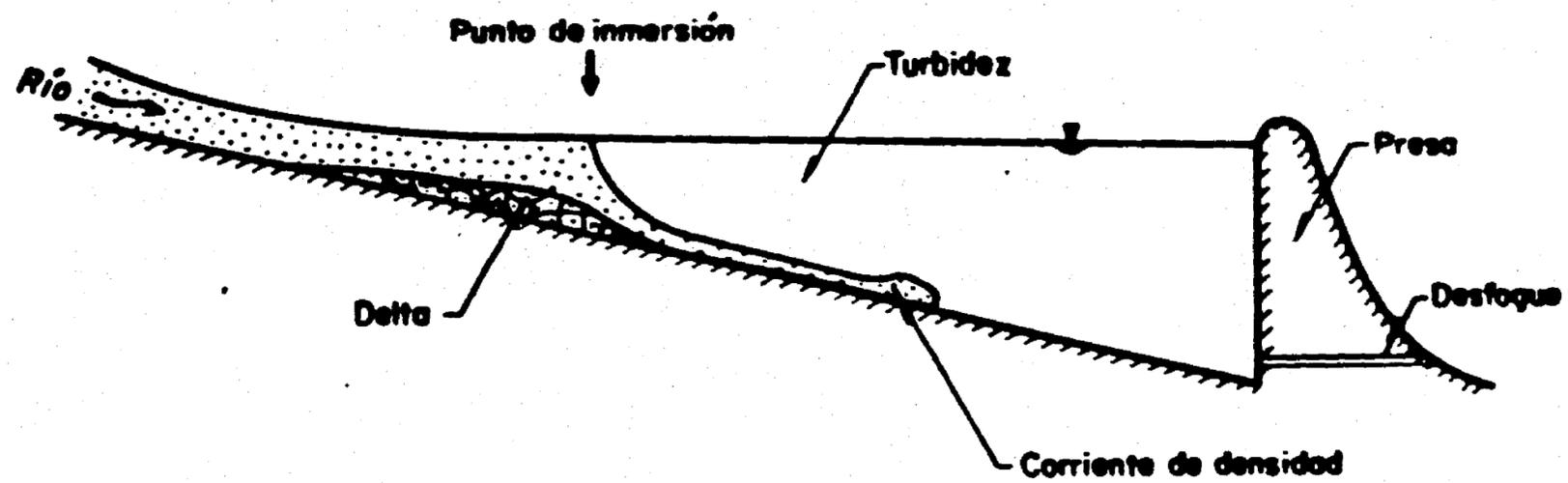


Fig 6.1 Esquema general del comportamiento del sedimento en suspensión dentro de un embalse.

El fenómeno descrito anteriormente se ha podido reproducir fácilmente en los laboratorios (refs 17, 27, 32) e incluso, se sabe que pueden existir corrientes que no viajan necesariamente por el fondo, sino que pueden hacerlo por alguna zona intermedia o por la superficie del vaso (ref 9). Estas corrientes de laboratorio generalmente son producidas empleando descargas de agua caliente o con sal, pero no con sedimento. En los prototipos, las corrientes de densidad son un fenómeno aún en discusión, ya que mientras hay autores que habiendo realizado mediciones en prototipo (ref 25), indican que la existencia de una corriente de densidad es un fenómeno poco probable, en contraste, existen otros autores (ref 4, 24), que indican que sí ocurren tales corrientes y que incluso han podido ser transitadas por las obras de desfogue, aliviando así el problema de sedimentación.

Lo que puede destacarse claramente del párrafo anterior, es que mientras en el laboratorio es posible simular fácilmente el fenómeno de las corrientes de densidad empleando materiales no sedimentables y desarrollar teorías para explicar su comportamiento, en los prototipos, donde las corrientes son producidas por la presencia de sedimento, el fenómeno está poco estudiado y aún no está bien definido.

Se sabe sin embargo que en algunos embalses, cuando no lle-

gan a formarse las corrientes de densidad, se produce una turbidez generalizada en el vaso (refs 1, 20).

PLANTEAMIENTO TEORICO DEL PROBLEMA

Para realizar el planteamiento teórico, se proponen las siguientes hipótesis.

a) El fluido es incompresible. En el rango de variación de presiones y temperaturas del fenómeno, no hay una variación significativa del volumen.

b) Las diferencias de densidad (en el rango probado), no alteran la viscosidad del fluido, y ésta es similar a la del agua simple.

c) El fenómeno es bidimensional. El movimiento del material sólido dentro del embalse, no tiene una componente transversal al flujo significativa.

d) El material en suspensión no se sedimenta mientras el agua que lo transporta esté en movimiento. Esto implica que el material en suspensión se deposita hasta que la velocidad del flujo es prácticamente nula.

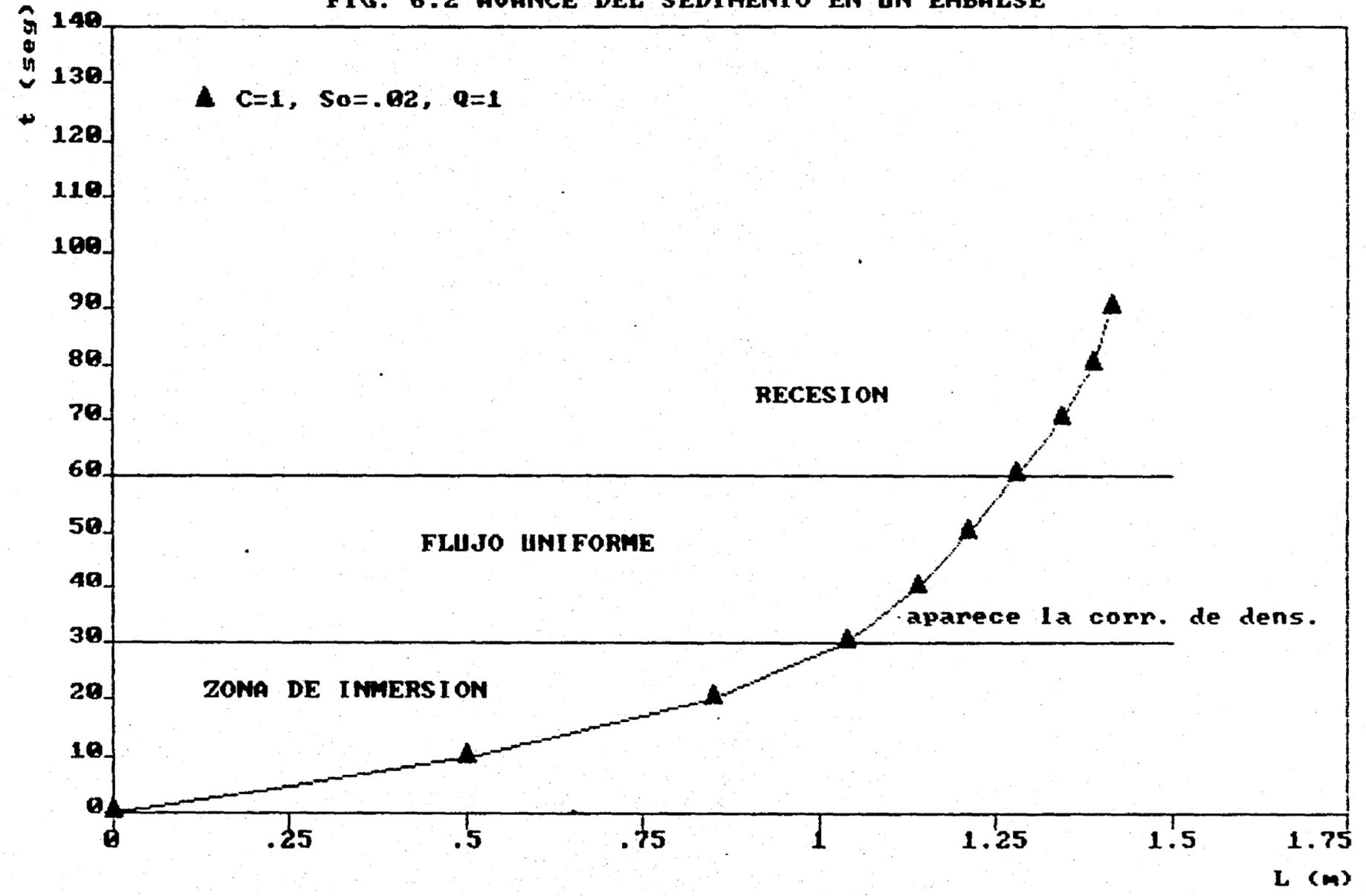
Las fases en que puede dividirse el avance del sedimento dentro de un embalse, pueden ilustrarse observando la curva

de la fig 6.2, la cual corresponde a una prueba donde la pendiente era del .02 y el gasto de 1 l/min. En la primera fase se forma la zona de inmersión, la cual termina al aparecer la corriente de densidad. La segunda corresponde al avance de la corriente mientras continúa entrando agua al embalse y la tercera es la fase de recesión, que se inicia al suspender la entrada del gasto y termina cuando la corriente se detiene. A continuación se plantean las ecuaciones correspondientes.

Fase 1. Formación de la zona de inmersión. La corriente de entrada se mezcla con el agua almacenada y se presenta un avance rápido del sedimento en suspensión hasta alcanzar una cierta distancia, después de la cual el sedimento ya no puede continuar viajando de igual forma y aparece una corriente de densidad por el fondo.

La interpretación que se propone es la siguiente. Como el agua entrante penetra a una concentración (C_0) y existe un mezclado en la zona de inmersión, la concentración de sedimento (C) en dicha zona es menor que la de entrada ($C < C_0$), al continuar alimentando agua al embalse, el sedimento en suspensión ocupará toda la sección transversal y se moverá hacia adelante (difusión convectiva). Esto ocurrirá hasta que se alcance un valor crítico del mezclado ($M = C/C_0$), el cual también estará asociado al tirante (Y_c) del frente de avance del sedimento. Cuando esto ocurre, la corriente

FIG. 6.2 AVANCE DEL SEDIMENTO EN UN EMBALSE



no puede continuar viajando ocupando toda la sección del cauce y se produce entonces un flujo de sedimento por la parte inferior. De aquí en adelante, el punto donde ocurre el rompimiento permanece prácticamente fijo (punto de inmersión) y el sedimento continuará viajando a través del embalse como una corriente de densidad.

La ecuación que representa el avance del sedimento en esta primera fase puede obtenerse como sigue.

Planteando la ecuación de continuidad para la mezcla agua-sedimento se tiene

$$\frac{\delta (A V C)}{\delta x} + T \frac{\delta (y C)}{\delta t} = 0 \quad (6.1)$$

con A área de la sección transversal (m²)

V velocidad media (m/s)

T ancho de la superficie libre (m)

y tirante (m)

x coordenada horizontal (m)

t tiempo (s)

C concentración de sedimento (gr/l)

Para el dispositivo experimental empleado se puede plantear la ecuación (6.1) como (deducción en el apéndice D)

$$\frac{\overline{Q C_0}}{\Delta x} = \frac{b \bar{y} \bar{C}}{\Delta t} \quad (6.2)$$

siendo

$\overline{Q Co}$ entrada promedio de sedimento

$b = T$ ancho del canal

\bar{y} tirante promedio

\bar{C} concentración promedio

Como $\overline{Q Co} = Q Co$ por ser constante el gasto, puede plantearse la ecuación 6.2 en diferencias finitas para el instante $i+1$ como

$$(Q Co \Delta t)_{i+1} = (C b \bar{y} \Delta x)_{i+1} \quad (6.3)$$

como $M = C/Co$ y despejando a Δx_{i+1} se tiene

$$\Delta x_{i+1} = \frac{(Q \Delta t)_{i+1}}{b \bar{y} M_{i+1}} \quad (6.4a)$$

Para la zona de inmersión, se puede entonces plantear una ecuación sencilla pues

$$\bar{y} = \frac{S_0 (L_i + L_{i+1})}{2}$$

y como $\Delta x_{i+1} = L_{i+1} - L_i$

la ecuación (6.4) puede escribirse como

$$L_{i+1} - L_i = \frac{2 (Q \Delta t)_{i+1}}{S_0 b (L_{i+1} + L_i) M_{i+1}} \quad (6.4b)$$

si $L_i = 0$ para $t_i = 0$

La ecuación (6.4b) puede expresarse como

$$L_{s+s}^2 = \left(\frac{2Qt}{S_o b M} \right)_{s+s}$$

o bien

$$L = \left[\frac{2 Q t}{S_o b M} \right]^{1/2} = \frac{2 Q t}{b Y M} \quad (6.4c)$$

En las pruebas realizadas se observó que la ecuación de avance era del tipo $L=A t^{1/2}$, la cual concuerda con la ecuación (6.4c). Esto significa que puede considerarse que en cada prueba $M \approx \text{cte}$, por lo cual

$$L = A t^{1/2} \quad (6.5)$$

siendo $A = \left[\frac{2 Q}{b S_o M} \right]^{1/2} \quad (6.6)$

La velocidad puede calcularse como

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{2} A t^{-1/2} \quad (6.7)$$

La ecuación (6.5) puede aplicarse mientras no aparezca una corriente de densidad, ya que en ese momento el sedimento no ocupará toda la sección transversal.

Para determinar el instante en que aparece la corriente de densidad, o sea el momento en que se alcanzan las condiciones críticas entre el mezclado y el tirante, se puede

emplear la ecuación (6.4c).

Despejando MY

$$MY = \frac{2 Q t}{b L} \quad (6.8)$$

substituyendo (6.5) en (6.8) y simplificando

$$MY = \frac{2 Q Jt}{b A} \quad (6.9)$$

substituyendo (6.6) en (6.9) y simplificando

$$MY = \frac{2 Q}{b} \frac{Jt \sqrt{(b S_o M)}}{\sqrt{(2 Q)}}$$

o sea

$$MY = \left[\frac{2 Q S_o M}{b} \right]^{1/2} Jt \quad (6.10)$$

Si se acepta la existencia de $(MY)_c$, e igual a .007 según las pruebas realizadas, se tiene que de la ecuación (6.10) el instante en que aparece la corriente (t_c) está dado por

$$t_c = \frac{(.007)^2 b}{2 Q S_o M} \quad (6.11)$$

En resumen la ecuación (6.4c), permite calcular el avance del frente del sedimento y es aplicable hasta que se alcanza el tiempo indicado por la ecuación (6.11). A partir de este momento sigue la segunda fase que se describirá más ade-

lante.

El resultado hasta aquí obtenido, permite determinar si el sedimento en suspensión podrá o no formar una corriente de densidad, pues de no alcanzarse la condición crítica la corriente de densidad no se formará y el sedimento avanzará como una turbidez generalizada.

En las pruebas realizadas con pendiente nula, aunque la evolución del fenómeno es igual a la descrita anteriormente, no es posible aplicar las ecuaciones antes deducidas pues $S_0=0$. Por esta razón, se desarrolló otro planteamiento que siguiendo los mismos principios, permitiera determinar la longitud recorrida y el momento en que aparece la corriente de densidad para dichas condiciones.

Con referencia a la fig 6.3, la evolución de la zona de inmersión cuando $S_0=0$, se puede calcular empleando la ecuación de continuidad como

$$Q t C_0 = Y b L C \quad (6.12)$$

Siendo Y el tirante en el embalse, por lo tanto, despejando a L y como $M = C/C_0$

$$L = \frac{Q t}{Y b M} \quad (6.13)$$

En las pruebas realizadas se observó que la longitud de

avance se ajustaba a una ecuación del tipo

$$L = A_0 t^{1/4} \quad (6.14)$$

igualando (6.14) y (6.13)

$$\frac{Q t}{Y b M} = A_0 t^{1/4} \quad (6.15)$$

despejando A_0

$$A_0 = \frac{Q t^{3/4}}{Y b M} \quad (6.16)$$

Como para un caso dado Y , b y Q son constantes, entonces se concluye que M varía con $t^{3/4}$

Sin embargo, como (de 6.14)

$$t^{3/4} = L^3/A_0^3 \quad (6.17)$$

substituyendo (6.17) en (6.16) y simplificando

$$A_0 = \sqrt[4]{(Q/Yb) (L^3/M)^{1/4}} \quad (6.18)$$

En las pruebas realizadas, se encontró que $(L^3/M)^{1/4} \approx 1.3$, por lo cual

$$A_0 = 1.3 \sqrt[4]{(Q/Yb)} \quad (6.19)$$

finalmente, substituyendo (6.19) en (6.14)

$$L = 1.3 \sqrt[4]{(Q/Yb)} t^{1/4} \quad (6.20)$$

Para calcular las condiciones críticas se puede partir de la ecuación (6.16) despejando a t_c

$$t_c = \left[\frac{A_o b (YM)_c}{Q} \right]^{4/3} \quad (6.21)$$

Substituyendo (6.19) en (6.21) y simplificando

$$t_c = (1.3)^{4/3} \left[\frac{(MY)_c^4}{Y} \right]^{1/3} \frac{b}{Q} \quad (6.22)$$

También en este caso, la zona de inmersión estará definida por la ecuación 6.20 empleando el tiempo indicado por (6.22).

Fase 2. Avance de la corriente de densidad. Una vez que aparece la cabeza de la corriente de densidad (fig 6.1), ésta avanzará por el fondo con una velocidad prácticamente constante, hasta que se suspende el gasto de entrada.

Se propone que dadas las características del flujo en esta etapa y por lo expuesto en el capítulo cinco, la fórmula de Chezy permite representar el movimiento de la corriente.

Cuando se forma la corriente de densidad, la ecuación (6.3) puede presentarse como

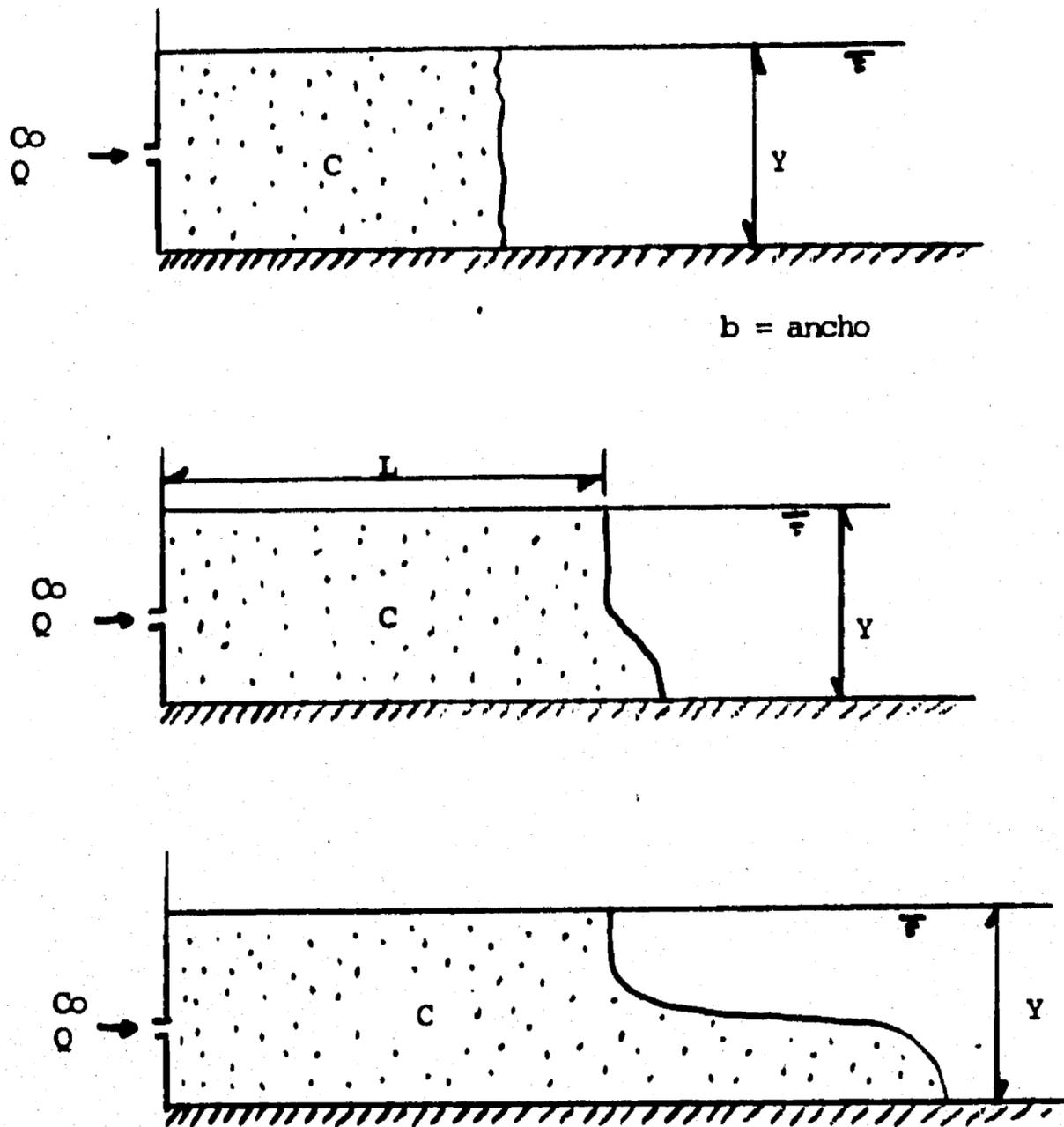


Fig 6.3. Canal con pendiente cero.

$$C_{i+1} b y \Delta x_{i+1} + C_{i+1} b y \sum_0^i \Delta x_i =$$

$$= (Q C_0 \Delta t)_{i+1} + C_i b y \sum_0^i \Delta x_i \quad (6.23)$$

despejando a Δx_{i+1}

$$\Delta x_{i+1} = \frac{(Q C_0 \Delta t)_{i+1}}{b y C_{i+1}} + \left[\frac{C_i}{C_{i+1}} - 1 \right] \sum_0^i \Delta x_i \quad (6.24)$$

En régimen establecido y suponiendo $y \approx$ cte. (de las observaciones en el laboratorio), se puede establecer que h_f (pérdidas por rozamiento) $\approx S_0 \Delta x$.

Se propone que la velocidad se represente como (ref. 2B)

$$V = \left[\frac{B g'}{f} R S_0 \right]^{1/2} \quad (6.25)$$

con $g' = g(W_2 - W) / W_2$

donde V velocidad promedio de avance de la corriente (m/s)

f factor de rozamiento

g' gravedad densimétrica (m/s²)

W peso específico del agua embalsada (kg/m³)

W_2 peso específico de la mezcla agua sedimento (kg/m³)

g aceleración gravitacional (m/s²)

R radio hidráulico (m). En este caso el perímetro mojado incluye también a la interfase

(superficie) de la corriente de densidad.

So pendiente del fondo

Para facilitar el empleo de la ecuación anterior, se propone emplear el factor "n" de la ecuación de Manning para calcular el rozamiento. Por lo tanto, como

$$\sqrt{(8g/f)} = R^{2/3} / n \quad (6.26)$$

Substituyendo (6.26) en (6.25) y agrupando

$$V = \frac{R^{2/3}}{n} \left[\frac{W_2 - W}{W_2} R S_0 \right]^{1/2} \quad (6.27)$$

simplificando

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \left[\frac{W_2 - W}{W_2} S_0 \right]^{1/2} \quad (6.28)$$

El avance, entre el momento en que aparece la corriente y se suspende el gasto, está dado por la ecuación (6.28), pero como $V = \frac{x}{t}$, entonces

$$\frac{x_{t+1}}{t_{t+1}} = \frac{1}{n} R^{2/3} \left[\frac{W_2 - W}{W_2} S_0 \right]^{1/2} (t_{t+1} - t_t) \quad (6.29)$$

La ecuación (6.29) permite calcular el avance en el intervalo

$$t_t < t < t_{t+1}$$

siendo t_1 el momento en que se corta el gasto y t_2 cuando aparece la corriente de densidad.

En esta etapa, se supone que el mezclado (M) de la corriente entrante no cambia y es igual a la que se produce en la zona de inmersión, por lo tanto, para una sección rectangular y suponiendo que la diferencia de densidades sólo se debe a la presencia del sedimento se puede plantear la ecuación (6.29) como

$$\Delta x_{t_1 \rightarrow t_2} = \frac{1}{n} \left[\frac{b y}{2b+2y} \right]^{2/3} \left[\frac{\Delta W}{W^2} \right]^{1/2} \frac{1}{S_0} (t_{t_2} - t_{t_1}) \quad (6.30)$$

ya que $R = by/(2b+2y)$ y $\Delta W = M Co (1-W/\tau_s)$

con Co y W en gr/l, t en seg., b y y en m.

Las ecuaciones 6.24 y 6.30 permiten calcular el avance de la corriente en régimen establecido.

Cuando la pendiente es nula, se puede establecer que

$$\Delta x_{t_1 \rightarrow t_2} = \frac{F}{n} \left[\frac{b y}{2b+2y} \right]^{2/3} \left[\frac{\Delta W}{W^2} \right]^{1/2} (t_{t_2} - t_{t_1}) \quad (6.31)$$

donde F es un factor experimental (.05), obtenido de las pruebas realizadas, que toma en cuenta la existencia del gradiente de energía.

En síntesis las ecuaciones (6.24) y (6.30), permiten calcular el avance de la corriente en un embalse con pendiente en la fase 2.

Fase 3. Recesión de la corriente. Una vez que se suspende el gasto la corriente se frenará paulatinamente, debido a la disminución de la concentración, como efecto de la sedimentación de las partículas y de la dilución de la corriente. En el caso de que la pendiente sea baja, es de esperarse que la desaceleración de las corrientes sea muy acentuada por las bajas velocidades, en tanto que en pendientes altas este efecto es menor, ya que la propia velocidad de la corriente, produce una mayor inercia después del corte y por consiguiente, las partículas de sedimento permanecen mas tiempo en suspensión, produciendo esto una recesión muy lenta.

Partiendo de la ecuación (6.24) y despejando $(C \Delta x)_{i+1}$ se tiene

$$C_{i+1} \Delta x_{i+1} = \frac{(Q \Delta t)_{i+1} C_0}{b y} + (C_i - C_{i+1}) \sum_0^i \Delta x_i \quad (6.30a)$$

Como se desconoce la manera en que influye el decremento de la velocidad en el depósito de sedimento, se propone que en la recesión, la concentración sea afectada por un factor P que toma en cuenta el decaimiento de la concentración debido a la sedimentación. Entonces la ecuación 6.30a será

$$C_{i+1} \Delta x_{i+1} = \frac{(Q \Delta t)_{i+1} C_0}{b y} + P C_i \sum_0^i \Delta x_i - C_{i+1} \sum_0^i \Delta x_i \quad (6.32)$$

El valor de P será calibrado al simular las pruebas experimentales realizadas.

En este caso la ecuación 6.30 puede presentarse como

$$\Delta x_{i+1} = \frac{1}{n} \left[\frac{b y}{2b+2y} \right]^{2/3} \left[\frac{\Delta W}{W_2} \right]^{1/2} S_0^{1/2} \Delta t \quad (6.33)$$

para pendiente nula

$$\Delta x_{i+1} = \frac{F}{n} \left[\frac{b y}{2b+2y} \right]^{2/3} \left[\frac{\Delta W}{W_2} \right]^{1/2} \Delta t \quad (6.34)$$

Las ecuaciones (6.32) y (6.33) permiten calcular el avance de la corriente en la etapa de recesión.

Un resumen de la aplicación de la teoría propuesta, para el avance del sedimento en un embalse con pendiente es el siguiente.

a) Dados Q, S₀, C₀ y b, el avance puede calcularse con la ecuación (6.4c), la cual servirá hasta que se alcance la condición crítica (6.11) (fase 1).

b) Una vez que se forma la corriente de densidad, pueden emplearse las ecuaciones (6.7) y (6.30) para calcular el tirante.

c) En la fase 2 (régimen establecido), se emplean las ecuaciones (6.24) y (6.30) para determinar el avance.

d) Cuando se suspende el gasto y hasta que la corriente se detiene o llega a la cortina (fase 3), se emplean las ecuaciones (6.32) y (6.33).

En el siguiente capítulo se muestran simulaciones del avance del sedimento de varias pruebas, aplicando la teoría propuesta, y en el cap B, se propone la aplicación a un posible caso real.

7.-SIMULACIONES NUMERICAS

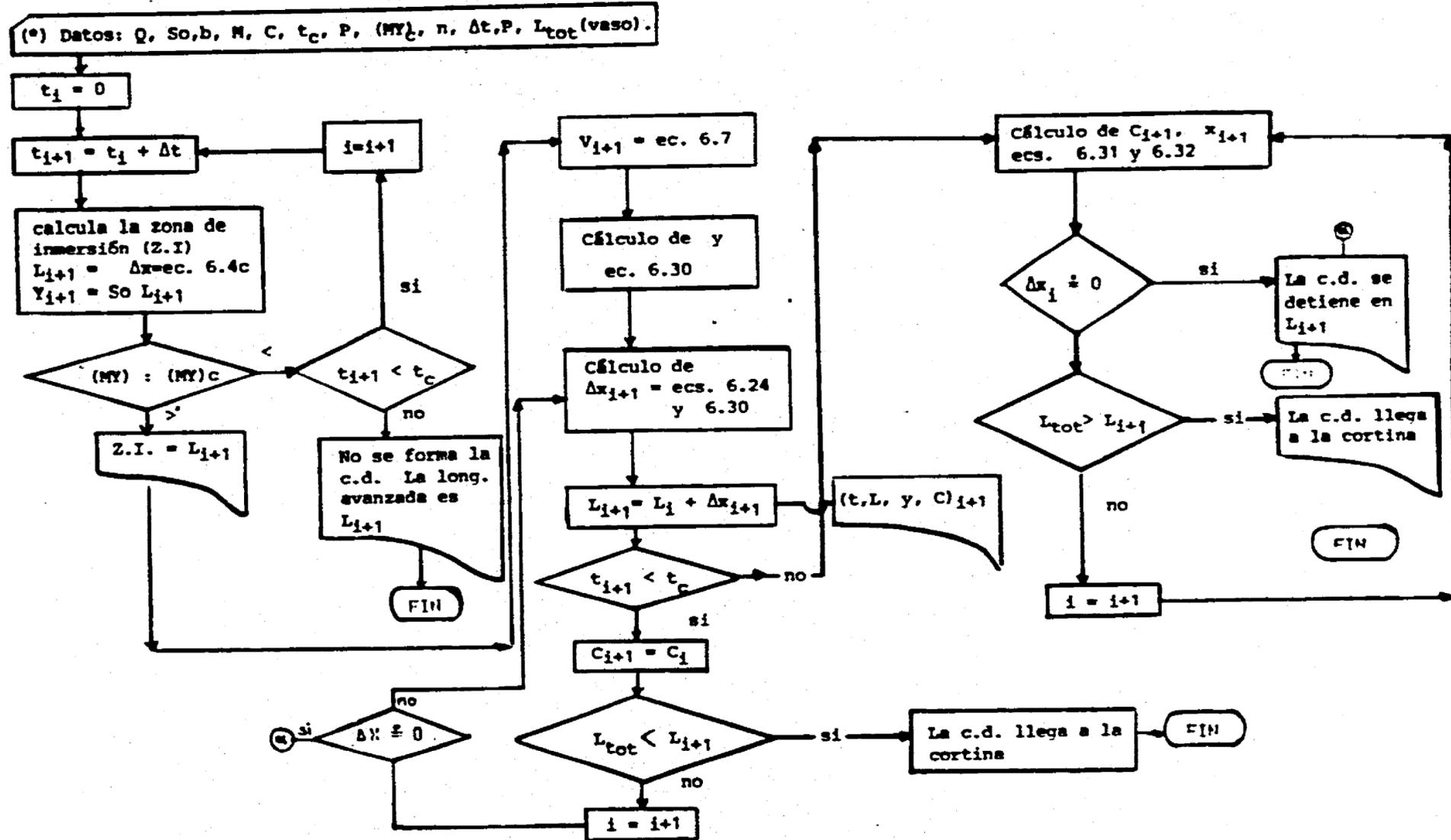
Para determinar la validez del planteamiento teórico del capítulo anterior, se simularon varias pruebas de cada etapa de la experimentación realizada.

En el cuadro 7.1, se muestra el digrama de flujo del procedimiento seguido.

Los resultados obtenidos se presentan en las figuras que adelante se indican. Las gráficas de dichas figuras se consideran claras por sí mismas; sin embargo se ha considerado conveniente incluir algunos comentarios adicionales.

Las gráficas representan el avance de la corriente en el tiempo y en cada una se han incluido las mediciones y la simulación realizada.

Cuadro 7.1. Diagrama de flujo



(*) La nomenclatura es la misma del texto

a) Figs. 7.1, 7.2 y 7.3. Corresponden a pruebas de la primera etapa ($S_0 = .06$), donde no hay estratificación de temperaturas. Las observaciones más importantes fueron la casi inexistente fase de recesión ($P = 1$) y la similitud de comportamiento de ambos materiales.

b) Figs. 7.4, 7.5 y 7.6. Estos casos también corresponden a la primera etapa pero para una pendiente de $S_0 = .02$. Aquí se destaca la importancia de la etapa de recesión ($P = .5$). El avance calculado muestra mejor similitud con la ceniza, aunque no se puede decir que el caolín muestra un comportamiento diferente. Estas pruebas se caracterizaron por lo tardío en que aparece la corriente de densidad y su dificultad de precisarlo. Por lo cual las diferencias observadas no se consideran radicales y el comportamiento medio es satisfactorio.

c) Figs. 7.7 y 7.8. Estas corresponden a la segunda etapa, donde se emplea una estratificación de 5 a 20 °C (fig. 7.7) y otra donde el agua embalsada era fría (5°C), sin estratificación. La temperatura de la mezcla de entrada era de 20°C (fig. 7.8). En ambas se muestra una buena similitud entre lo medido y lo simulado.

d) Figs. 7.9, 7.10 y 7.11. Las gráficas corresponden a pruebas de la tercera etapa. Los números de los paréntesis

corresponden a la estratificación de temperaturas en grad. cent. En general los ajustes son satisfactorios, salvo en la curva de la gráfica 7.11 correspondiente al embalse no estratificado (20-20), donde como era de esperar no se observa fase de recesión.

e) Figs 7.12, 7.13 y 7.14. Corresponden a la cuarta etapa. En general también las simulaciones son satisfactorias, y se observa la similitud de comportamiento de los dos materiales empleados (caolín y mat. Balsas).

f) Fig. 7.15. Las gráficas de ésta figura corresponden a las pruebas en un canal con curvas. La comparación entre lo medido y lo simulado es evidente por si misma.

En todas las simulaciones se empleó un factor de $n = .013$, (Manning) salvo en el caso del canal con curvas donde fué de $.018$. Tales factores coinciden, en términos generales, a los obtenidos mediante el criterio normal de selección de ese factor. Esto no es extraño, pues el empleo de la fórmula densimétrica, contempla dicha posibilidad (ref.28).

Los valores de P en la etapa de recesión, con que se obtuvieron mejores simulaciones estuvieron en el rango de 1 ($S_0 = .06$) a 0.8 ($S_0 = .02$). Sin embargo cuando las concentraciones eran bajas ($< 3 \text{ gr/l}$) y existía estratificación de temperaturas, $P = 0.5$.

Es en la etapa de recesión donde probablemente haya necesidad de mejorar las simulaciones, pues el criterio propuesto es aún muy general. Sin embargo como lo muestran los resultados, las aproximaciones obtenidas se estiman satisfactorias dada la simplicidad del cálculo y los objetivos de este trabajo.

En todas las simulaciones se empleó un valor de $(MY)_c = .007$, sin embargo, se observó que en los casos correspondientes a embalses con estratificación de temperaturas, un valor de $(MY)_c = .011$ mejora el cálculo. Se considera que esto es debido principalmente a que, en la fase de mezclado, el intercambio de temperatura afecta la formación de la condición crítica.

En el siguiente capítulo se presenta un criterio para aplicar la teoría propuesta a condiciones diferentes a las de los ensayos realizados.

FIG. 7.1 PENDIENTE $\beta_0=0.96$ $(\sigma=10, \rho=1)$

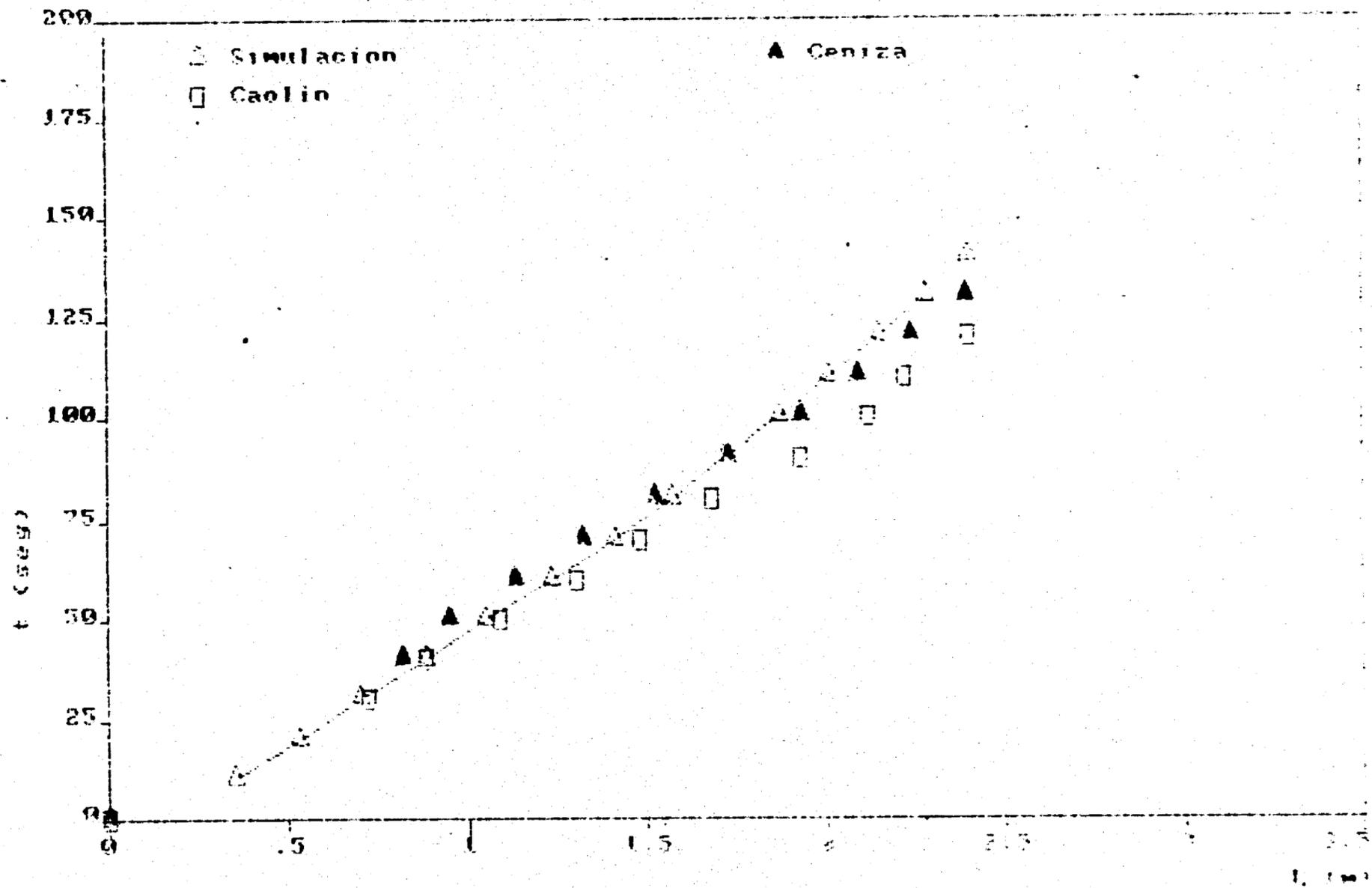


FIG. 7.2 · PENDIENTE $S_0=0.06$ ($C=10, Q=1.2$)

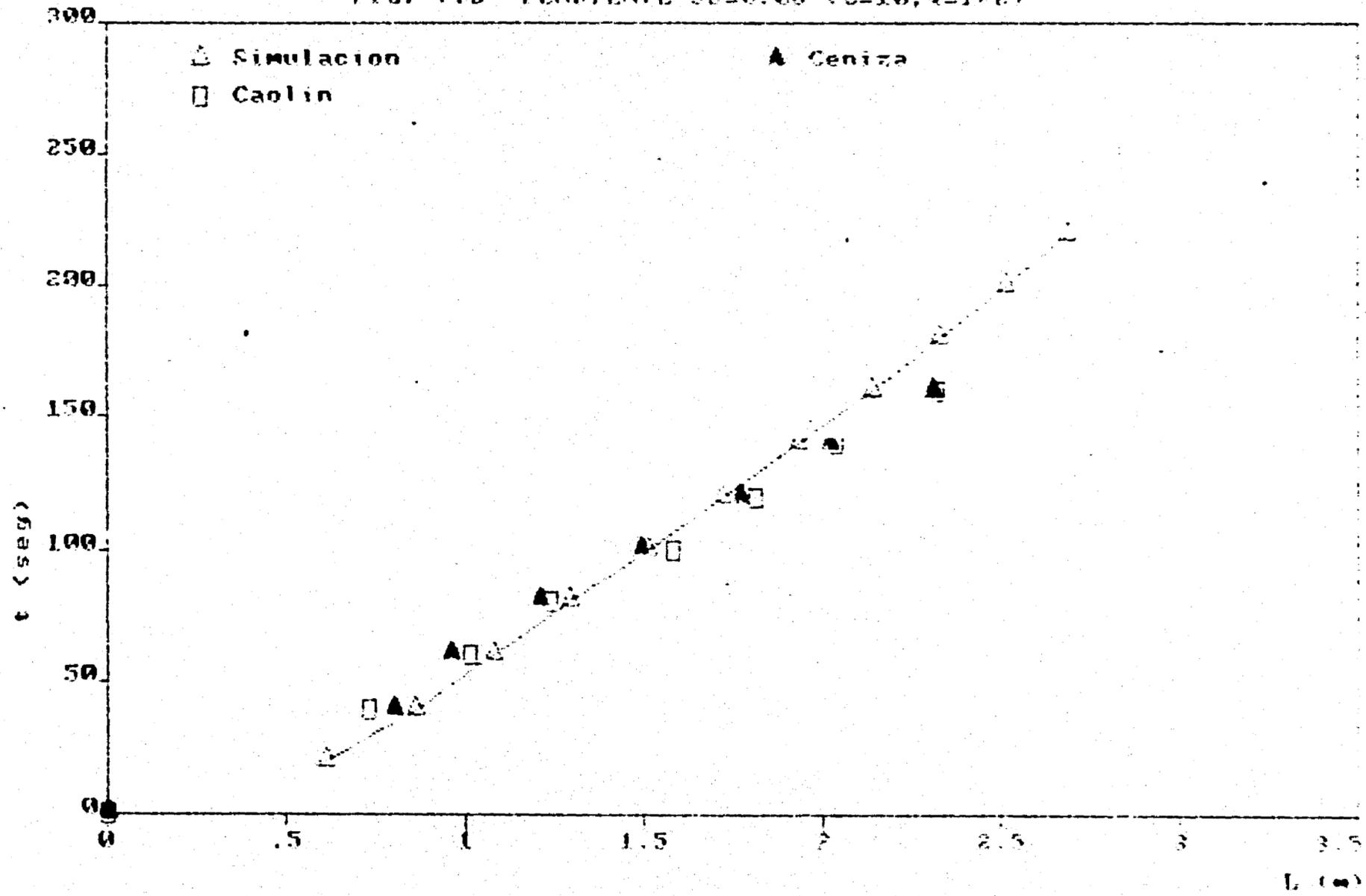


FIG. 7.3 PENDIENTE $S_0=0.06$ ($C=10, \theta=1/4$)

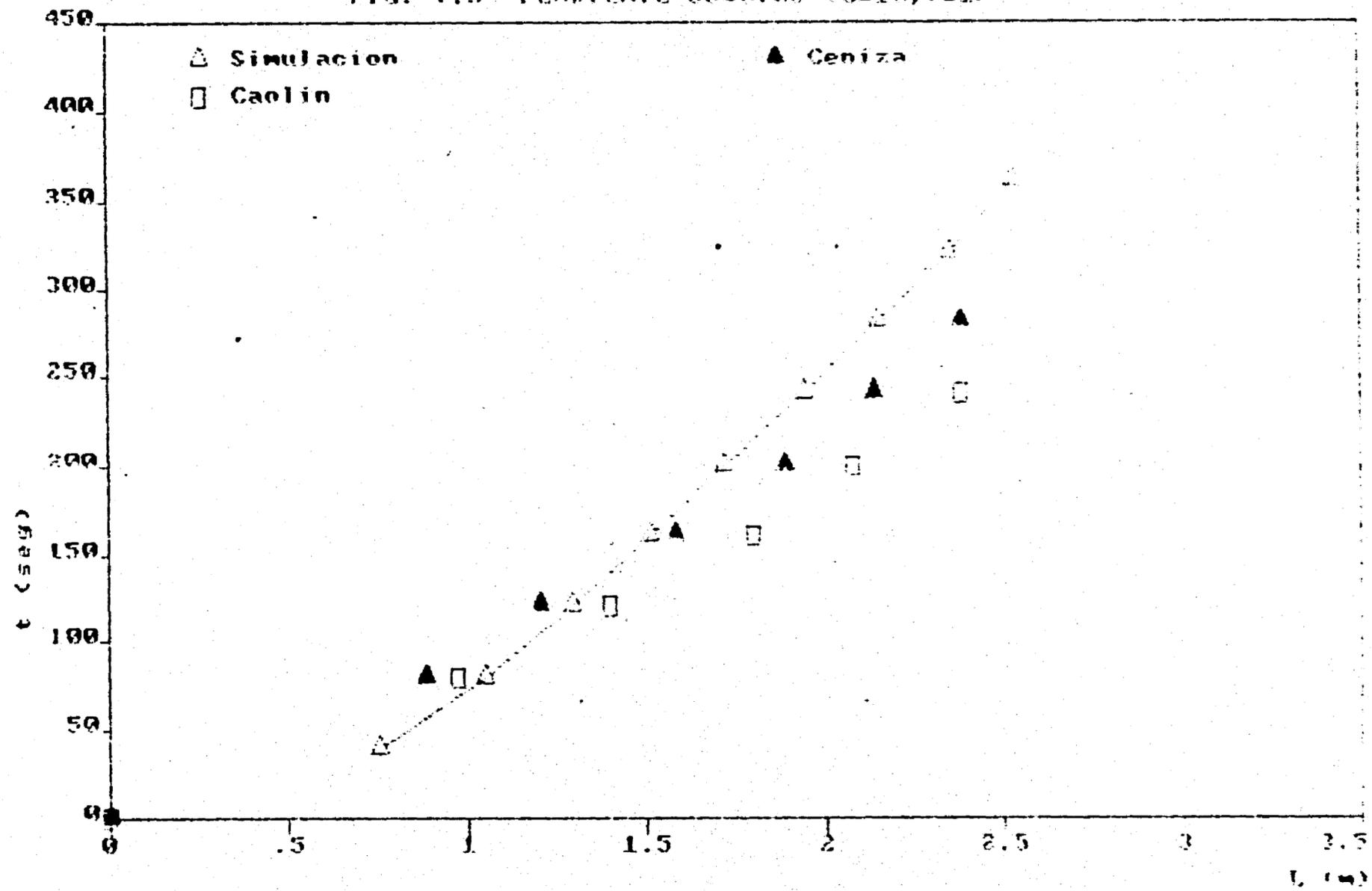


FIG. 7.4 PENDIENTE $S_0=0.02$ ($C=10, \theta=1/2$)

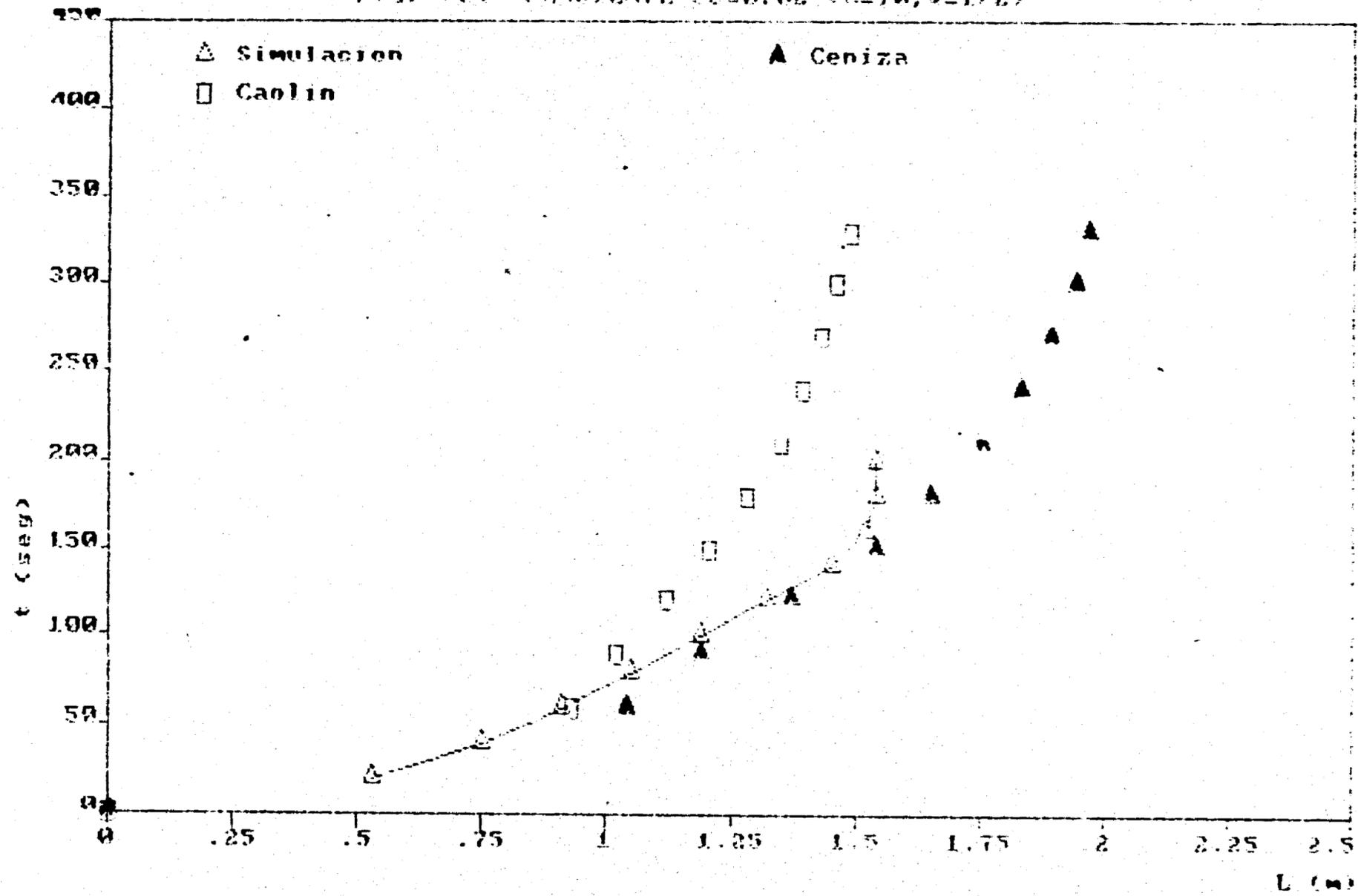


FIG. 7.5 PENDIENTE $S_0=0.02$ ($C=10, D=1$)

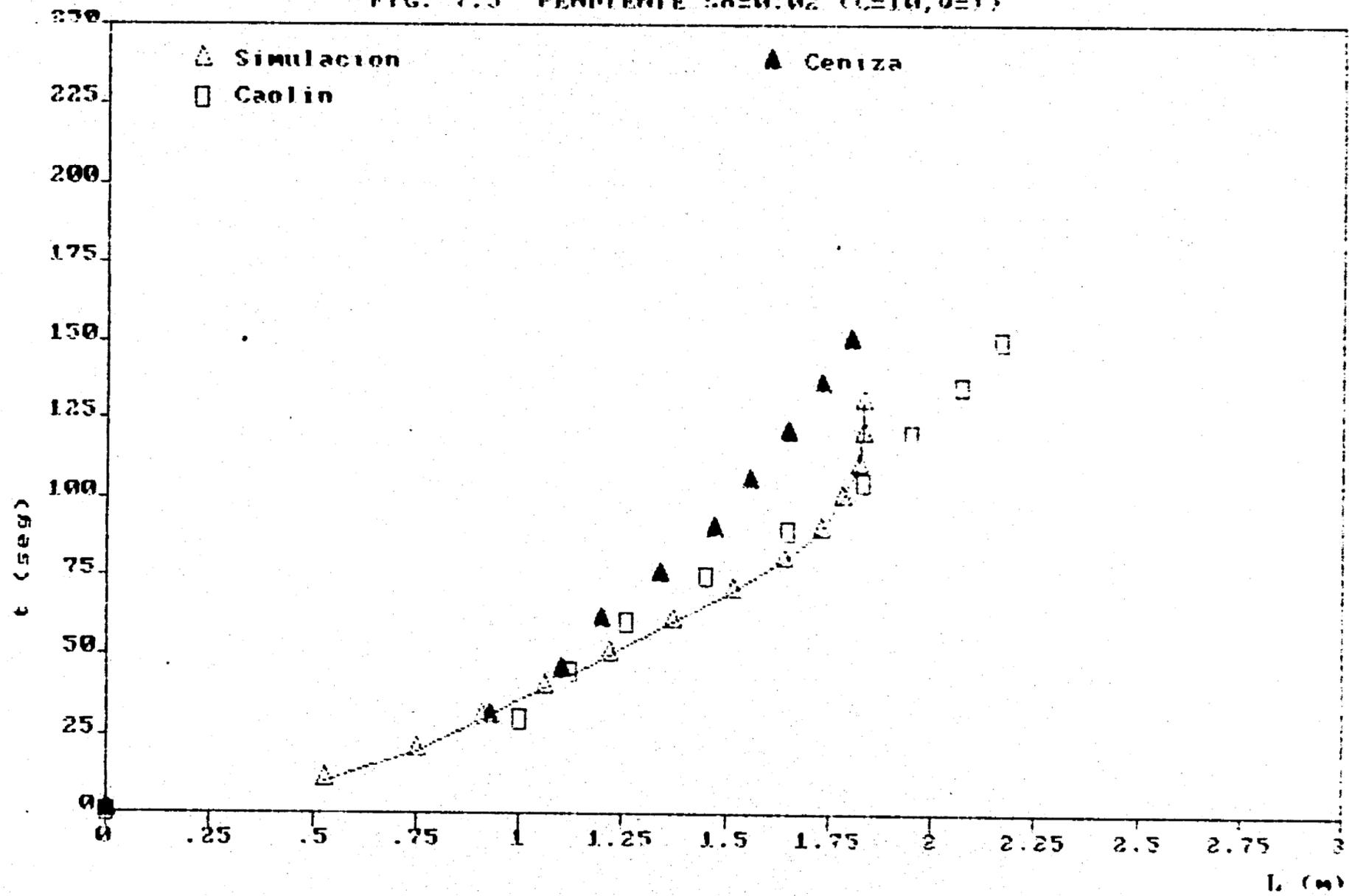


FIG. 7.6 PENDIENTE $\theta=0.02$ ($Q=1/4, C=10$)

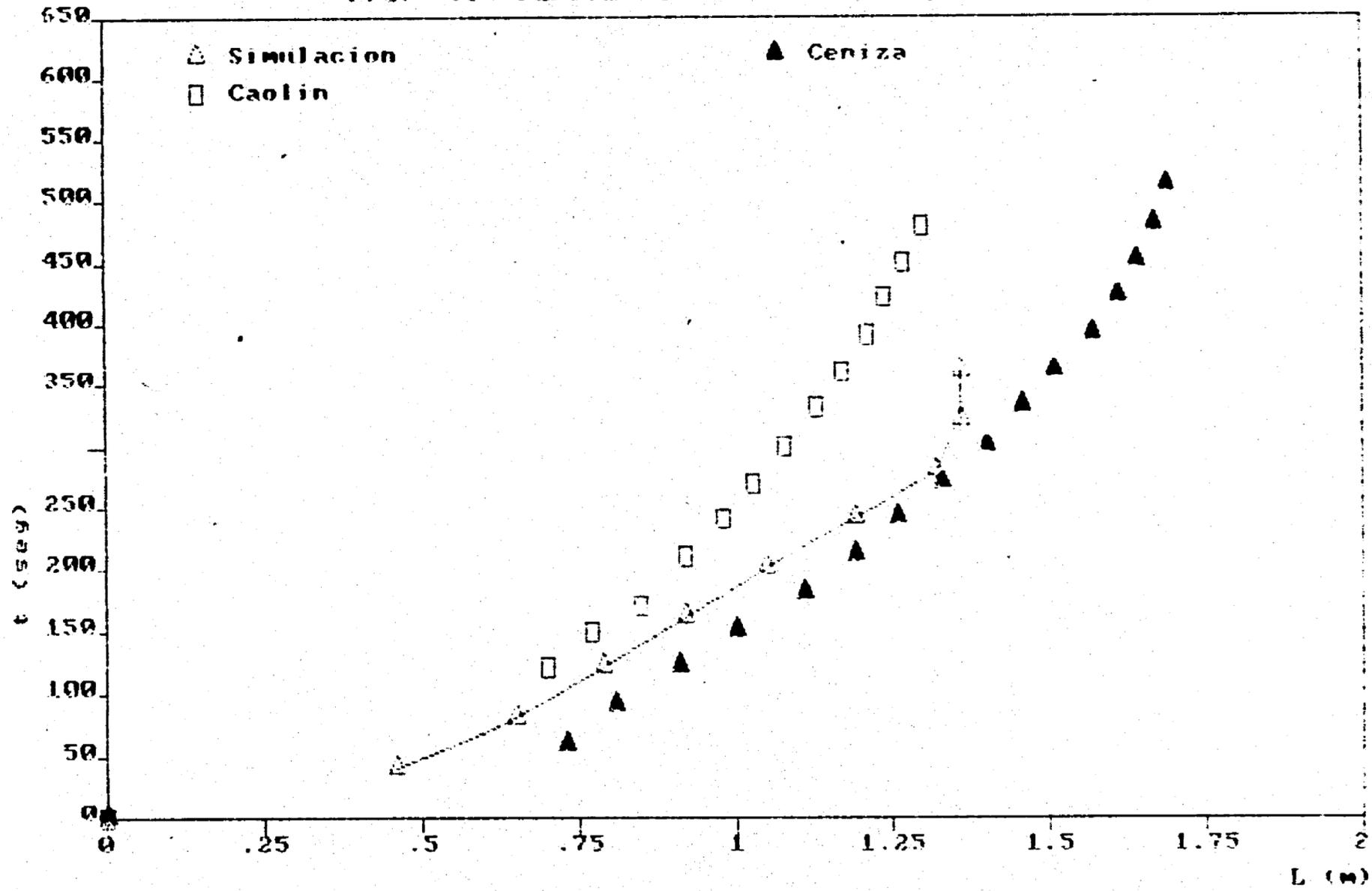


FIG. 7.7 PENDIENTE $S_0=0.02$ ($Q=1$, estratificadas)

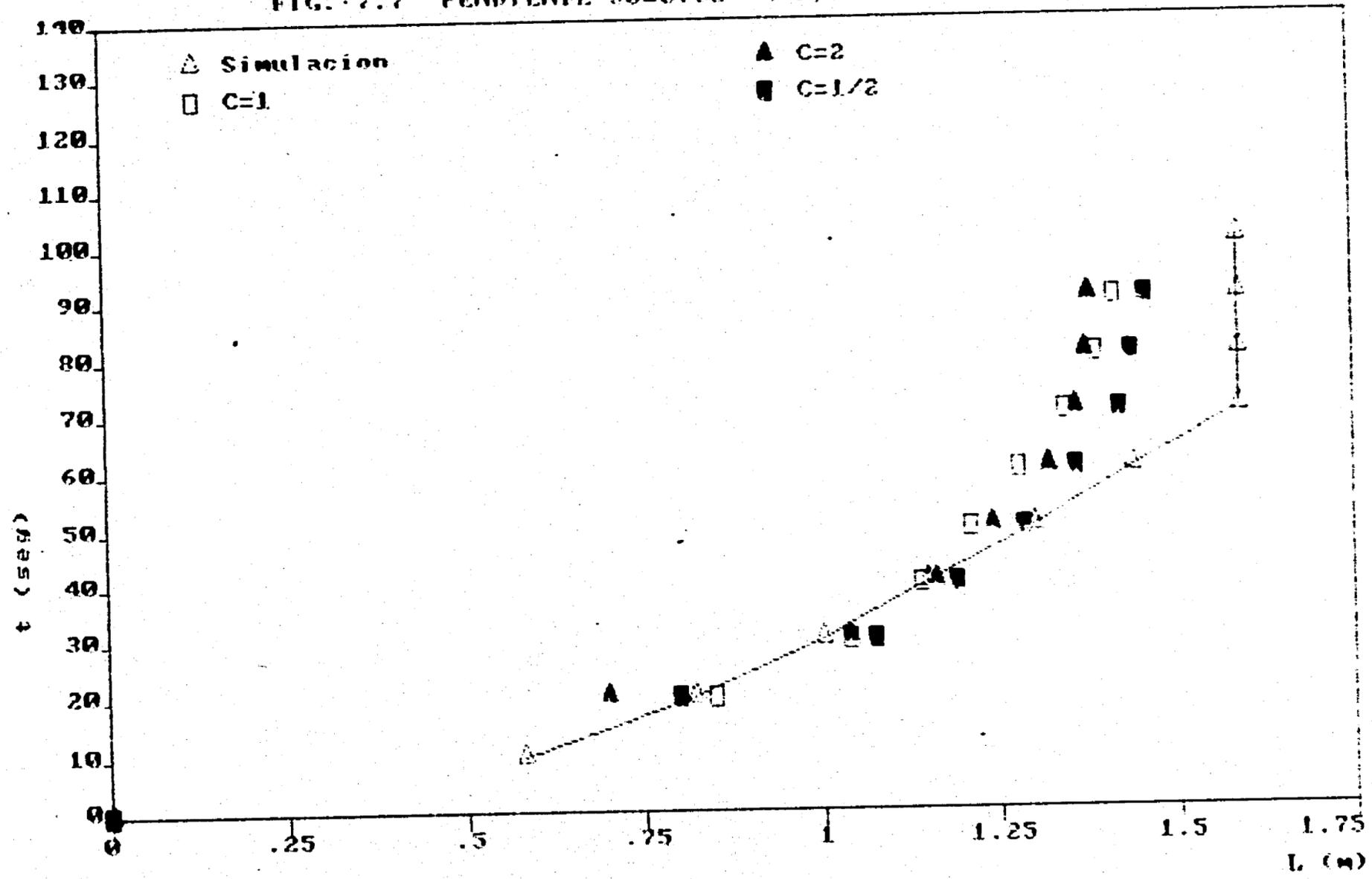


FIG. 7.8 PENDIENTE $S_0=0.02$ ($\theta=1/4$, sin estratificación)

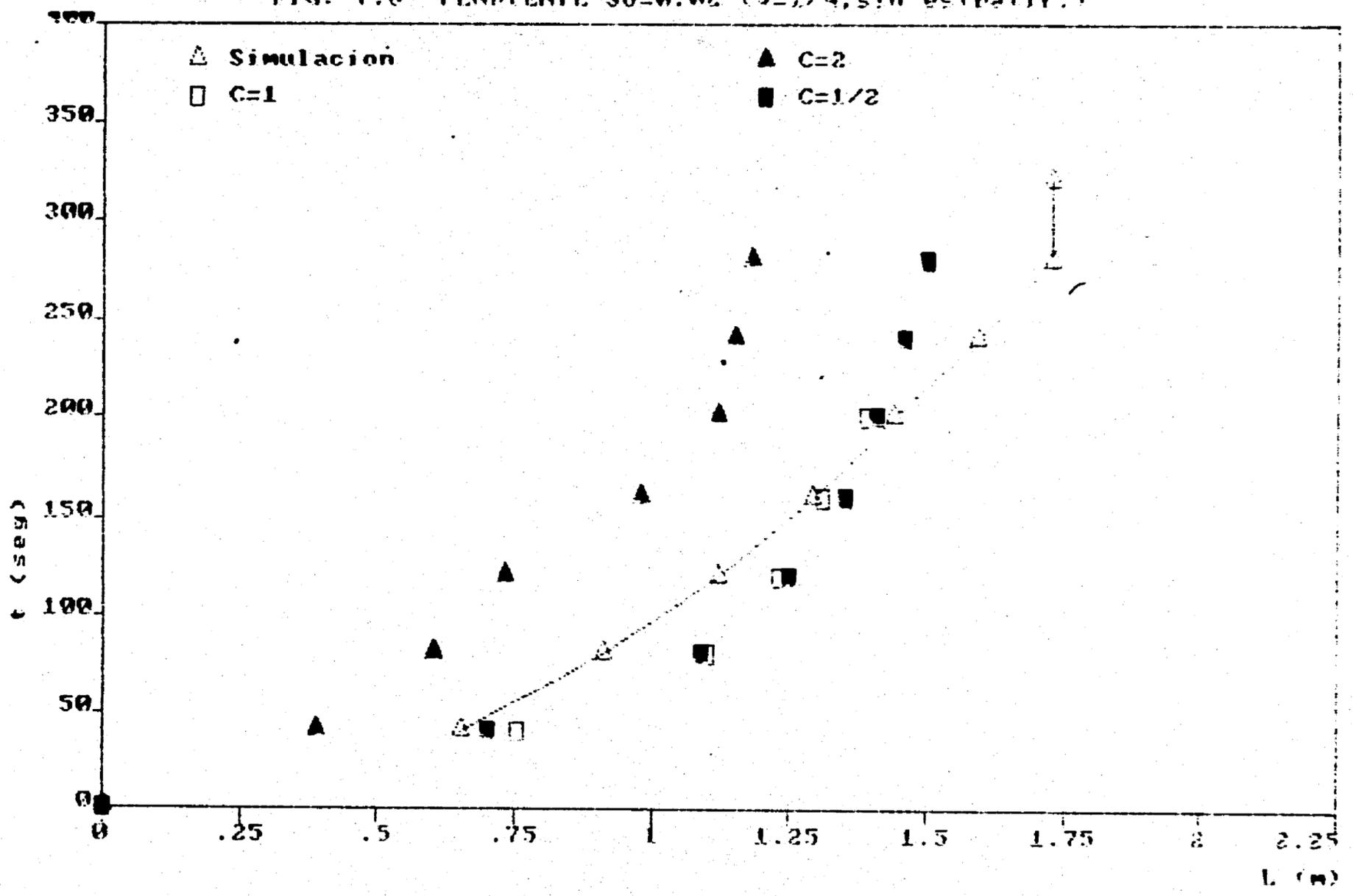


FIG. 7.9 DESC. INTERM. ($S_0=0, \theta=1/4, C=1/2, \text{caplin}$)

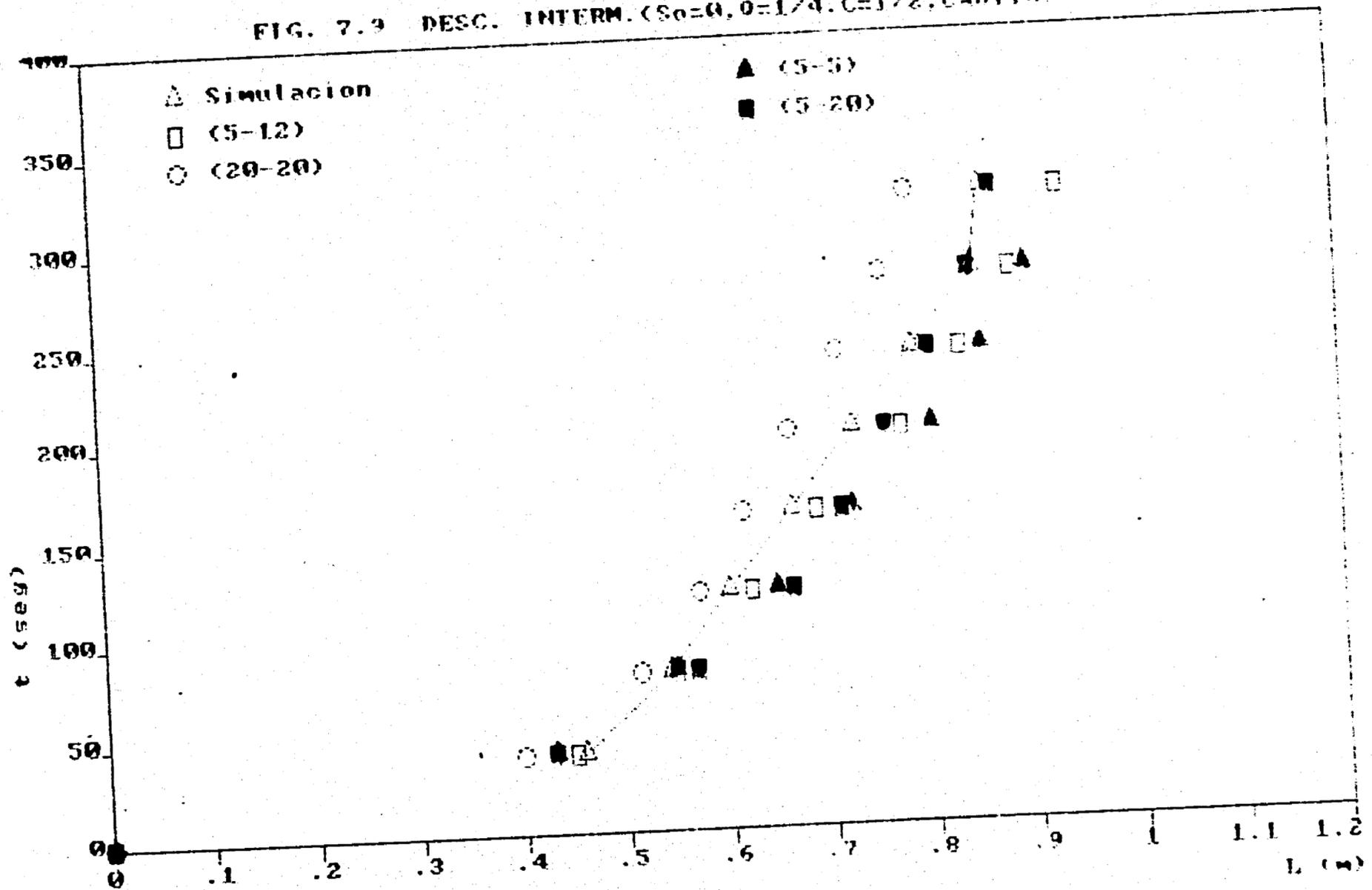


FIG. 7.10 DESCARGA INTERMEDIA ($Q=1, C=1/2$)

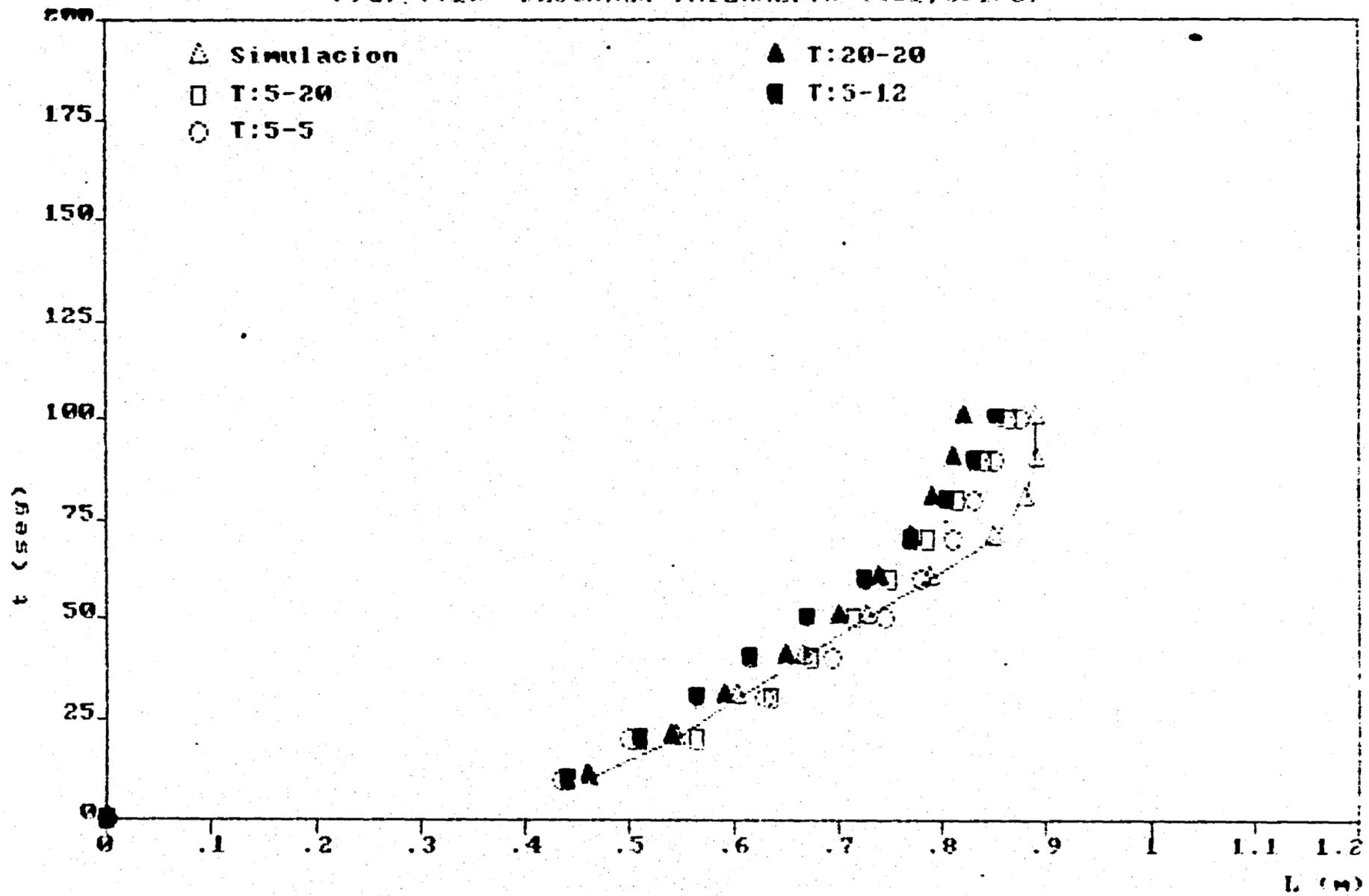


FIG. 7.11 DESCARGA INTERMEDIA ($Q=1/4, C=2$)

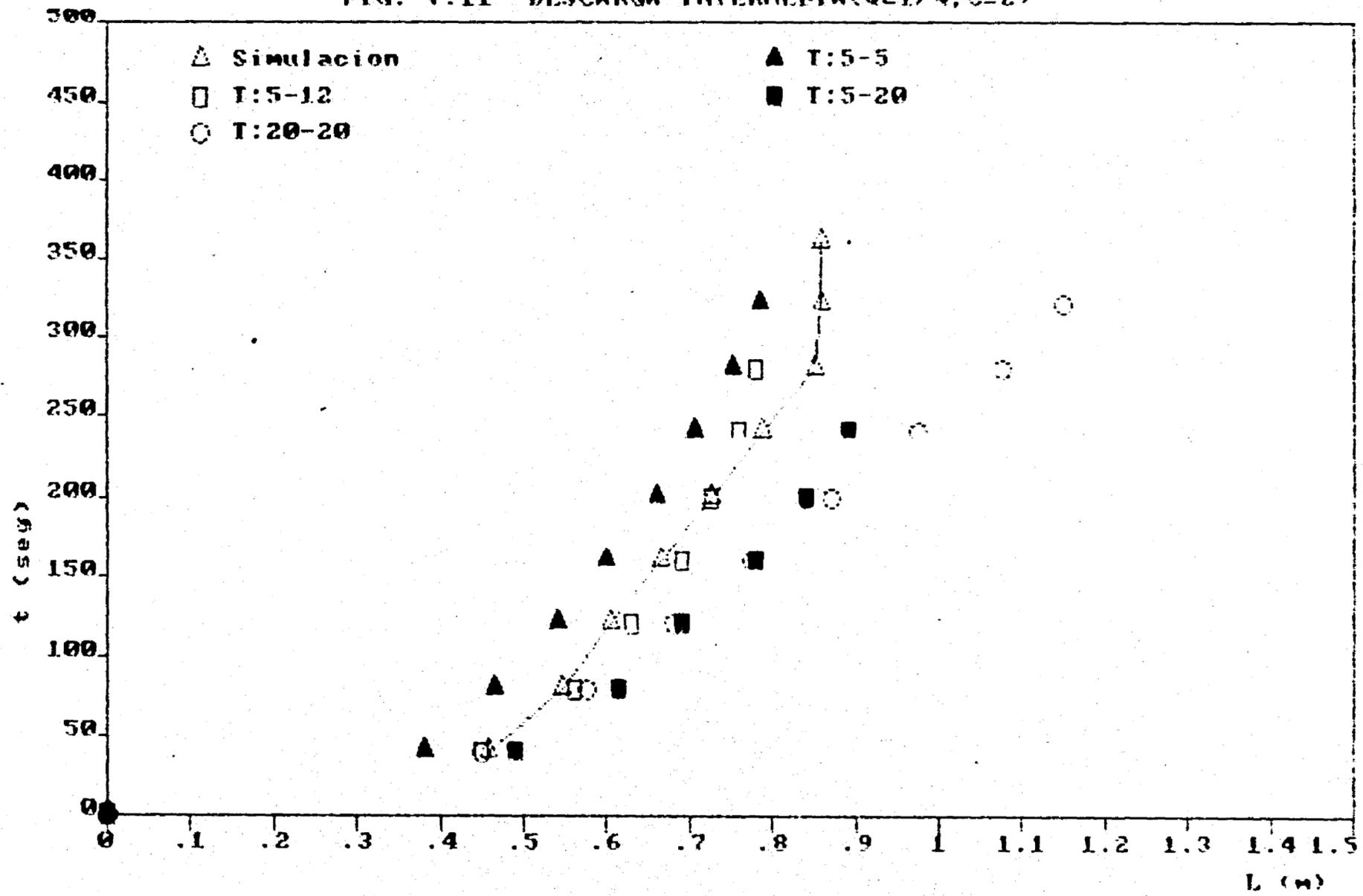


FIG. 7.12 DESC. INTERM. ($Q=1, Ca_{lin}$)

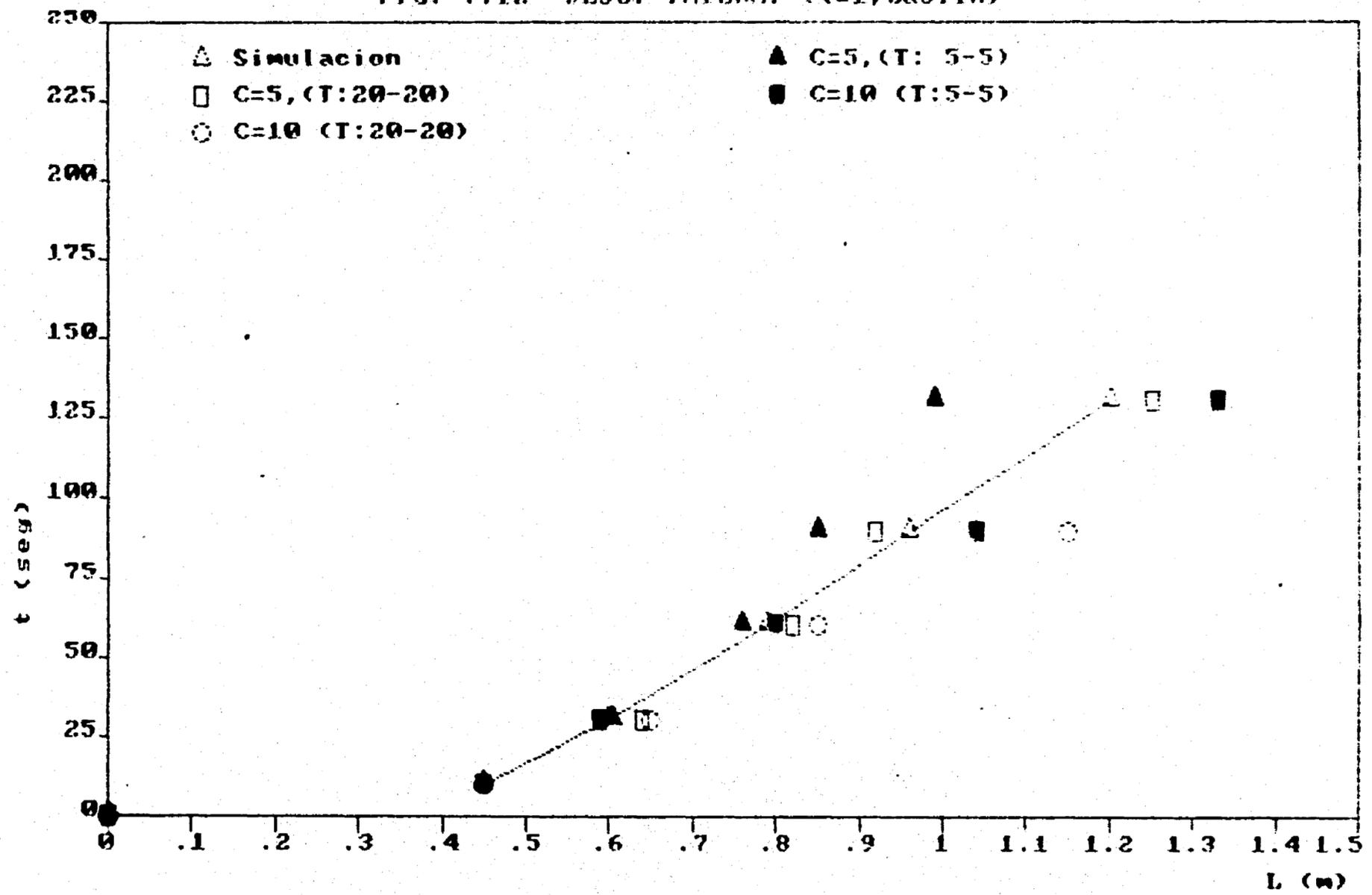


FIG. 7.13 DESCARGA INTERMEDIA (Q=1, Balsas)

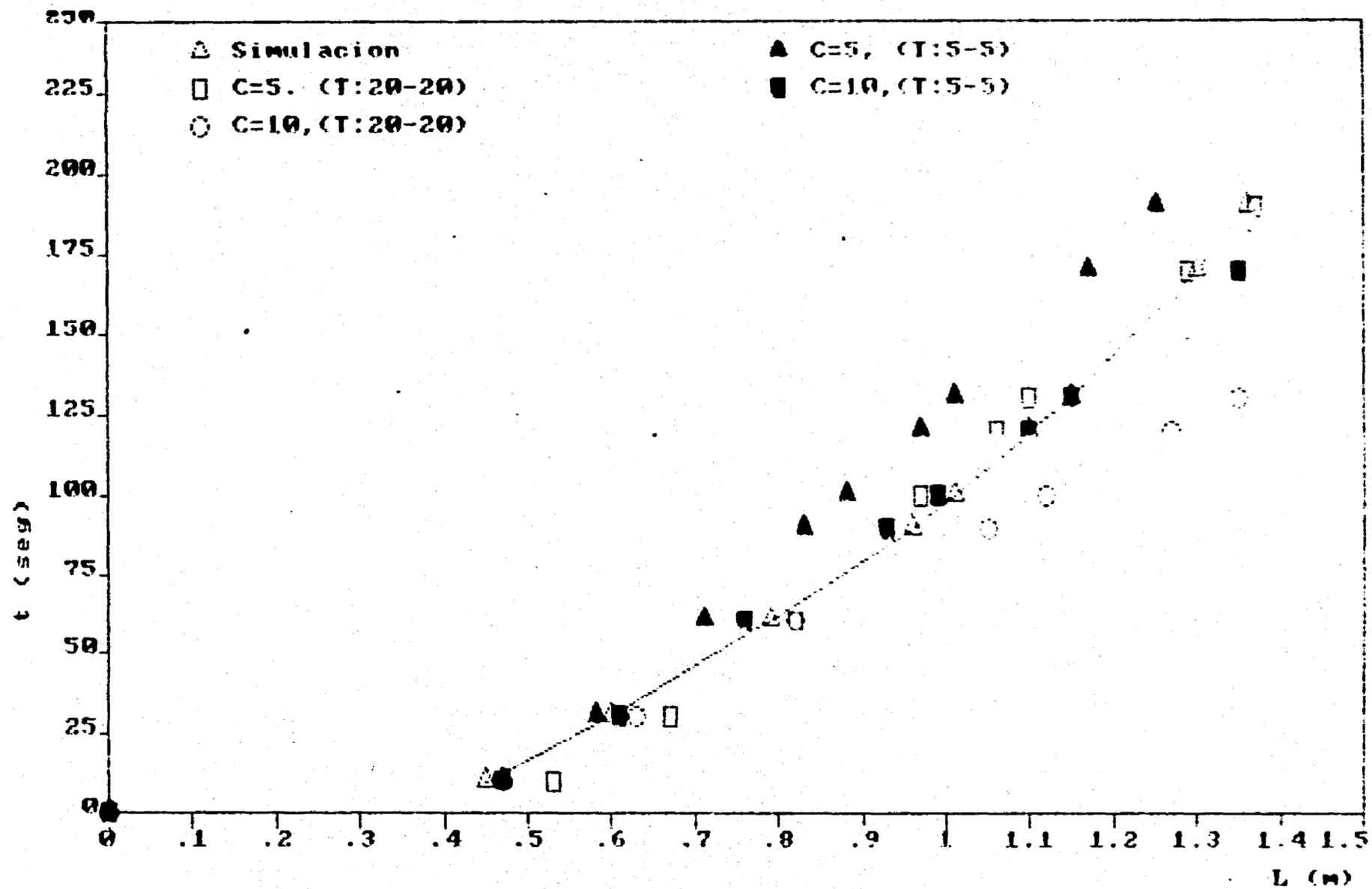


FIG. 7.14 DESCARGA INTERMEDIA ($Q=1$, Bafes)

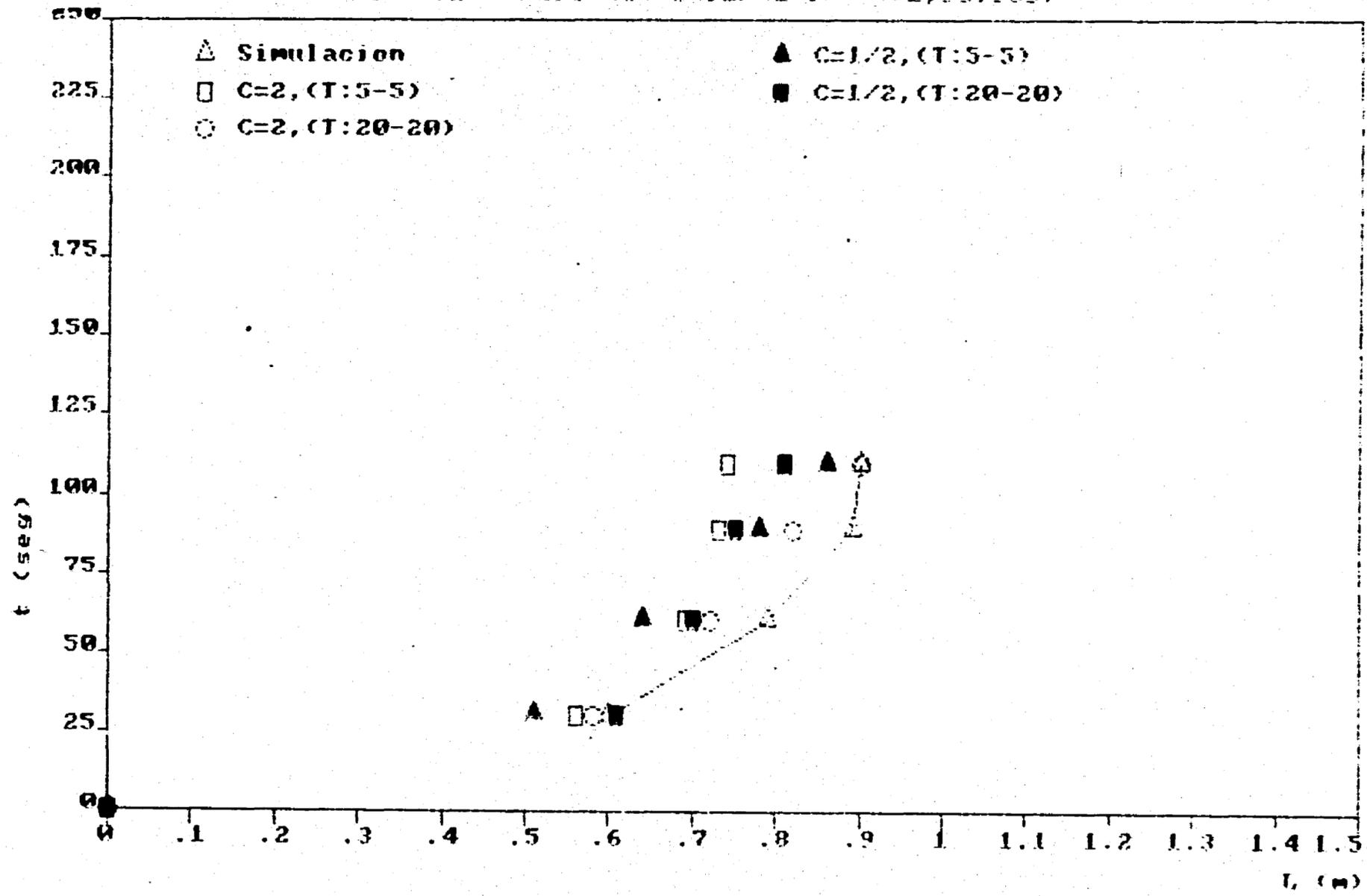
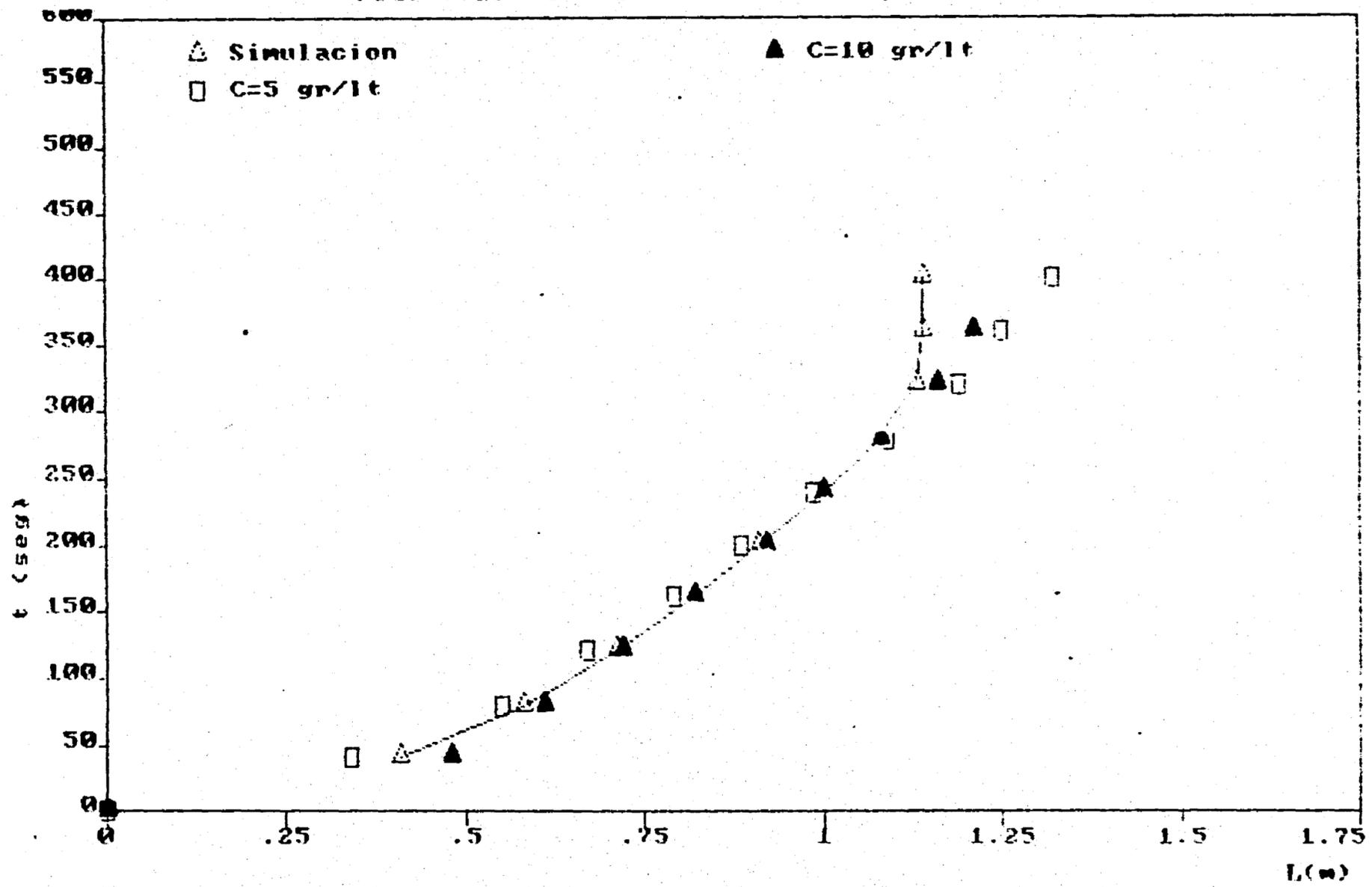


FIG. 7.15 CANAL CURVO ($S_0=0.02$, $Q=1/4$)



8.-LOS EMBALSES REALES Y EL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

Si bien es cierto que en este trabajo se ha propuesto como objetivo principal el explicar y cuantificar el comportamiento del material en suspensión en un embalse, a través de un estudio experimental en un canal de laboratorio, el fin último es aplicar los resultados (de laboratorio) a embalses reales. Para ello, sería conveniente disponer de información de campo, que permitiera comprobar la extrapolación hecha a partir de los resultados teórico-experimentales. Sin embargo para hacer dicha comparación, no se dispone de la información suficiente de campo ni en la literatura.

Lo anterior no evita la necesidad de hacer breves comentarios sobre la aplicación de los resultados obtenidos a un posible embalse real. Esto es particularmente importante en este caso por la gran diferencia de escalas.

Una reflexión importante estriba en que los experimentos realizados permitieron una explicación del fenómeno y la proposición de una teoría que prácticamente no depende de las condiciones de laboratorio puesto que requiere de un solo factor empírico adicional. Intencionalmente se trató de emplear parámetros y planteamientos sencillos, en los que si bien se pierde precisión, se gana generalidad. Sólomente existe un parámetro en la proposición teórica presentada, que es difícil conocer para la aplicación a un problema real y del cual si es necesario apoyarse en los resultados de laboratorio: la determinación de la condición crítica $(MY)_c$.

La ref. B indica que si es posible determinar las características medias de flujos turbulentos estratificados estables, en sistemas grandes tales como los que se presentan en la atmósfera, océanos y embalses. Para ello es necesario cumplir con dos condiciones, la igualdad de los números densimétricos de Reynolds $(Re)_d$ y Froude $(F)_d$ expresados como

$$(Re)_d = \frac{V_m H_m}{N_m + K_m} = \frac{V_p H_p}{N_p + K_p} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$(F)_d = \frac{V_m}{(g'_m H_m)^{1/2}} = \frac{V_p}{(g'_p H_p)^{1/2}} \dots\dots\dots (B.2)$$

siendo V velocidad (m/s)
 H tirante (m)
 N viscosidad cinemática (m²/s)
 K viscosidad vorticosa (m²/s)
 g' aceleración densimétrica (m/s²)

y m, p condiciones de modelo y prototipo respectivamente.

Como en los modelos de este tipo generalmente el flujo es laminar, entonces $K_m = 0$. Y como en los prototipos es muy turbulento, entonces $N_p \ll K_p$, con lo cual se puede suponer que $N_p \approx 0$. Según la ecuación (B.1) se tiene entonces que

$$(Re)_m = \frac{V_m H_m}{N_m} = \frac{V_p H_p}{K_p} \dots\dots\dots (B.1)$$

La ref. B también indica que en función de los resultados obtenidos en diferentes modelos y prototipos, la relación anterior es válida si K_p/N_m está en el rango de 1000 a 100000, por lo tanto, se concluye que es válida la semejanza de las condiciones promedio si

$$\frac{K_p}{N_m} = \frac{V_p H_p}{V_m H_m} = 1000 \text{ a } 100000 \dots\dots\dots (B.3)$$

Sin embargo, conviene señalar que la misma ref. B, indica que la determinación de K_p aún es motivo de investigación y por el momento no es posible precisarla para grandes sistemas como es un embalse.

Respecto del número de Froude si $g'_m \approx g'_p$ y definiendo a la escala de longitudes como

$$Le = \frac{L_p}{L_m} \dots\dots\dots (B.4)$$

entonces la ecuación 8.2 puede presentarse como

$$Ve = Le^{1/2} \dots\dots\dots (B.5)$$

y como consecuencia

$$Qe = Le^{5/2} \dots\dots\dots (B.6)$$

La ecuación 8.3 puede entonces escribirse como

$$\frac{K_p}{N_m} = Le^{3/2} = 1000 - 100000 \dots\dots\dots (B.3a)$$

La relación de escalas para $(MY)_e$ puede establecerse como

$$(MY)_{ce} = \frac{(MY)_{ep}}{(MY)_{em}} \dots\dots\dots (B.7)$$

pero

$$(MY)_{ce} = Le \dots\dots\dots (B.8)$$

como M es adimensional y según la ecuación 8.6

$$(MY)_{ce} = Q_e^{2/5} \dots\dots\dots (B.9)$$

empleando $(MY)_{em} = .007$ y $Q_m = 1/2 \text{ l/min} = 8.33 \text{ E-06 m}^3/\text{s}$, se puede establecer la condición crítica para el prototipo como

$$(MY)_{ep} = .75 Q_p^{2/5} \dots\dots\dots (B.10)$$

Ahora bien, como seguramente se necesitan emplear pendientes menores que las del dispositivo experimental, se puede establecer de acuerdo con la figura 8.1 que el volumen en la zona de inmersión sea

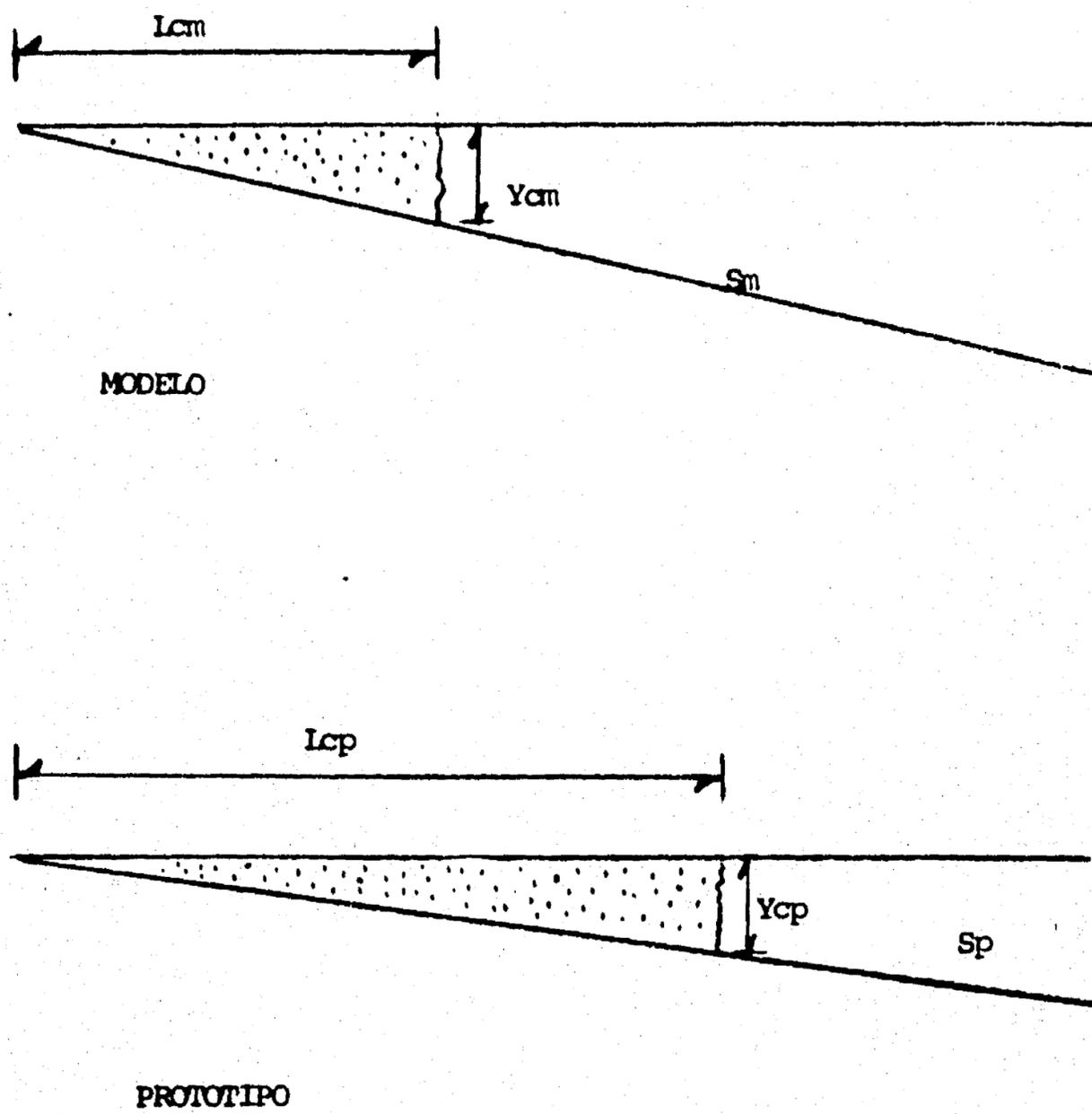


Fig 8.1 Relación de escalas entre modelo y prototipo en la zona de inmersión.

$$V_m = 0.5 L_{em} Y_{em} b_m M_m \dots\dots\dots (B.11)$$

$$y \quad V_p = 0.5 L_{ep} Y_{ep} b_p M_p \dots\dots\dots (B.12)$$

pero $S_m = Y_{em}/L_{em}$ y $S_p = Y_{ep}/L_{ep}$, por lo tanto las ecuaciones B.11 y B.12 se pueden escribir

$$V_m = 0.5 L_{em}^2 S_m b_m M_m \dots\dots\dots (B.13)$$

$$V_p = 0.5 L_{ep}^2 S_p b_p M_p \dots\dots\dots (B.14)$$

dividiendo (B.14) entre (B.13) y como $V_e = L_e^3$ se tiene

$$V_e = L_e^3 = L_e^2 S_e L_e M_e \dots\dots\dots (B.15)$$

por lo tanto $M_e = 1/S_e$ y

$$M_p = \frac{S_m}{S_p} M_m \dots\dots\dots (B.16)$$

Si $S_m = .04$ y $M_m = .27$

$$M_p = .0108 / S_p \dots\dots\dots (B.17)$$

Nótese en la ecuación anterior que el valor máximo de M_p no puede ser mayor de uno, por lo cual se concluye que para $S_p < .0108$, $M_p = 1$, en otras palabras, en un prototipo es muy probable que $C = C_0$, o sea que la concentración de la corriente de densidad es muy próxima a la de entrada.

Para comprobar la validez de las ecuaciones 8.10 y 8.17, y puesto que no se dispone de información de campo, se consideró que las pruebas de la etapa I correspondientes a las pendientes de .02 y .06 sirvieran como prototipos y se calcularan $(MY)_{ep}$ y M_p , y luego se compararan con las mediciones realizadas. En el cuadro 8.1 se muestran los resultados. Como puede observarse dado lo general del procedimiento, y la dificultad que ofrecen en la medición los fenómenos de este tipo (hidráulica fluvial).

Intentando complementar lo anterior, a continuación se presenta un ejemplo simplificado de un posible embalse real.

Supóngase que se tiene un embalse cuya forma es alargada y por lo tanto es aceptable la hipótesis de bidimensionalidad. Si la pendiente del fondo es constante de $S_p = .001$, según la ecuación 8.17, $M_p = 1$. Si además el ancho promedio fuera de 240 m y la altura de la cortina de 50 m, la longitud del vaso sería de $L = .001 \times 50 = 50$ Km.

Se desea saber cuál será la principal zona de depósito, si se formarán corrientes de densidad y si en tal caso llegarán a la cortina.

Las avenidas que se desean transitar tienen las siguientes características

Cuadro 8.1 Comparación de valores M_p y $(MY)_{cp}$ calculados y medidos

1 Datos	2 Medidos	3 Promedio	4 Calc. $\bar{x} \pm \sigma$	5 dif. (%) (3-4)/3	
So=.02 M_p		.44 ± .15	.5400	-.22	
	Q=1/4	.0032, .0046	.0039 ± .0009	.0053	-.35
	Q=1/2	.0106, .0066	.0086 ± .003	.0070	.19
	Q=1	.0130, .0051	.00905 ± .006	.0092	-.02
So=.04 M_p		.2687 ± .09	.27	.0	
	Q=1/4	.0048, .0043	.0046 ± .0004	.0053	-.15
	Q=1/2	.0067, .0066	.00665 ± .00007	.0070	-.15
	Q=1	.0093, .0104	.00985 ± .0008	.0092	.065
So=.06 M_p		.2 ± .086	.18	.10	
	Q=1/4	.0047, .005	.0049 ± .0002	.0053	-.08
	Q=1/2	.0048, .0079	.00635 ± .0002	.0070	-.10
	Q=1	.0120, .0078	.0099 ± .003	.0092	.07
Prom.				-.057	

Tr (años)	Qp (m ³ /s) prom.	Cop (gr/lt) prom.	duración (hs)	(MY) _{ap}
1	250	2	8	6.83
3	500	3	10	9.01
5	1000	5	12	11.90

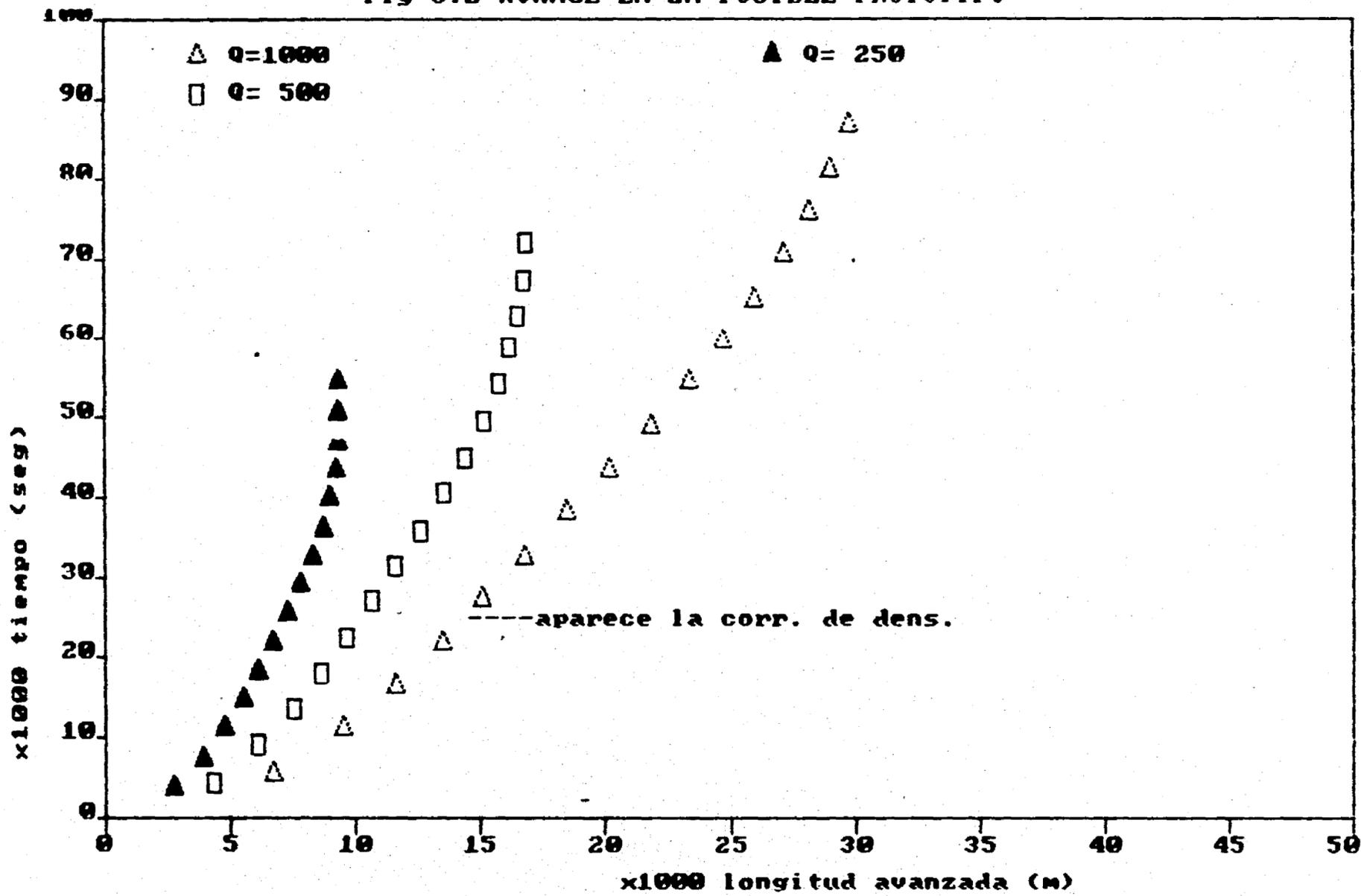
Efectuando las simulaciones con la teoría propuesta ($n = .02$), se obtienen los resultados mostrados en la figura 8.2. Las principales observaciones que pueden hacerse son las siguientes.

a) El punto de inmersión (Z.I.) se alcanza en siete hs aprox. De aquí se concluye que hidrogramas con duraciones menores no forman corrientes de densidad. La longitud de la Z.I., se encuentra entre los 8 y 15 Km de la entrada del vaso.

b) La corriente de densidad que se forma para el gasto más bajo, es muy pequeña y para fines prácticos puede decirse que gastos menores no formarán corrientes de densidad.

c) Para los gastos de $Tr = 1$ (o menores), la zona de depósito está en los primeros 8 Km, para $Tr = 3$ en los 17 Km y para $Tr = 5$, el sedimento alcanza a llegar hasta los 33 Km. Es conveniente hacer notar que para $Tr = 1$, el sedimento se deposita de manera prácticamente uniforme, pues no

fig 8.2 AVANCE EN UN POSIBLE PROTOTIPO



existe fase de recesión, en tanto que para $tr = 3$ el depósito constante ocurre hasta los 13 Km, luego se inicia la fase de receso donde disminuye la concentración (hasta .3 gr/lt) y por lo tanto el depósito en los últimos 4 Km. Para $Tr = 5$, el depósito constante ocurre en los primeros 22 Km y en los siguientes 11 Km se presenta un decaimiento de la concentración de 5 a .5 gr/lt.

En síntesis las corrientes de densidad no alcanzan a llegar a la cortina. La longitud máxima avanzada ($Tr = 5$) es de 33 Km. La principal zona de depósito ocurre desde la entrada hasta los 22Km.

d) Los tirantes de las corrientes de densidad son

$$y = 5.8 \text{ m para } Tr = 1$$

$$y = 7.8 \quad Tr = 3$$

$$y = 9.3 \quad Tr = 5$$

e) Se satisface la ecuación 8.3a, ya que los valores obtenidos para los diferentes gastos del parámetro Kp/Nm van de 30000 a 70000, los cuales están en el intervalo señalado como límite.

El problema propuesto aunque muy simplificado, permite tener idea de la manera en que podría aplicarse el procedimiento propuesto y de los resultados que se obtendrán.

Conviene señalar aquí la manera en que se podría determinar el espesor del sedimento acumulado. La cantidad total de sedimento P (en Kg) que entra al embalse en una avenida puede calcularse como

$$P = Q C_o T_a \quad (B.18)$$

Tomando en cuenta el peso específico del material sólido una vez depositado en el vaso W_s , se puede calcular el volumen (VS) haciendo

$$VS = P/W_s \quad (B.19)$$

Habiendo realizado la simulación de varias avenidas, es posible establecer la zona de depósito (L) y como se conoce el ancho (b), entonces es posible calcular el espesor (e) para el volumen total (VST) de sedimento con

$$e = VST/bL \quad (B.20)$$

Existen diversos criterios para determinar el peso específico del material que se deposita en un vaso (ref 6), por ejemplo el peso específico inicial puede determinarse con:

Tamaño del material en mm	W_s (Kg/m ³)
.5 - .064	1 400
.064 - .016	1 264
.016 - .004	880
.004 - .001	368
menor de .001	48

Es claro que para determinar correctamente las zonas de depósito, es necesario simular registros históricos o

sintéticos de la entrada de agua a un embalse. Sin embargo, para el ejemplo antes propuesto y con fines simplemente ilustrativos, supóngase que las avenidas indicadas son representativas de lo que sucede en un año si su ocurrencia fuera la siguiente

Q (m ³ /s) prom.	Ocurrencia en un año
250	20
500	5
1000	1

El sedimento que entraría al vaso, calculado con la ecuación (8.18), sería para Q de 250:

$$P_{250} = (250 \text{ m}^3/\text{s}) (2 \text{ Kg/m}^3) (8 \times 3600 \text{ s}) (20) = 2.88 \text{ EB Kg}$$

y el volumen ocupado (ec. 8.19), si $W_s = 880 \text{ Kg/m}^3$, sería

$$VS_{250} = 2.88 \text{ EB}/880 = 3.27 \text{ E5 m}^3$$

En forma similar para los otros gastos

$$P_{500} = (500) (3) (10 \times 3600) (5) = 2.7 \text{ EB Kg}$$

$$VS_{500} = (2.7 \text{ EB}/880) = 3.07 \text{ E5 m}^3$$

$$P_{1000} = (1000) (5) (12 \times 3600) (1) = 2.16 \text{ EB Kg}$$

$$VS_{1000} = 2.16 \text{ EB}/880 = 2.46 \text{ E5 m}^3$$

En total, la pérdida de capacidad en ese año sería de

$$PT = (3.27+3.07+2.46) \text{ E5} = 8.80 \text{ E5 m}^3$$

Si la capacidad total del embalse es de 300 E6m^3 , el

cálculo anterior indicaría que anualmente se pierde aproximadamente el 0.3%, o sea que en 30 años se perdería el 10%

de la capacidad total.

El espesor que tendría el sedimento dentro del vaso sería
(ec. 8.20)

$$e_{250} = 3.27 \text{ E5} / (240 * 8000) = 0.1700 \text{ m}$$

$$e_{500} = 3.07 \text{ E5} / (240 * 13000) = 0.0984 \text{ m}$$

$$e_{1000} = 2.46 \text{ E5} / (240 * 22000) = 0.0466 \text{ m}$$

En otras palabras, hasta los primeros 8 Km el espesor del sedimento sería $(0.170 + 0.0984 + 0.0466) = 0.315\text{m}$. De los 8 a los 13 Km, $(0.0984 + 0.0466) = .145\text{m}$ y de los 13 a los 22 Km, $.0466\text{m}$. Esto evidentemente altera la pendiente del fondo, hecho que deberá tomarse en consideración para las simulaciones de los años siguientes.

Para tomar en cuenta la acumulación de varios años se recomienda el criterio de Lara y Pemberton, en el cual se propone la siguiente ecuación

$$W_T = W_i + 0.4343 K \left[\frac{T}{T-1} \ln T - 1 \right] \quad (8.21)$$

donde W_T peso específico promedio después de T años de operación del embalse, en Kg/m^3

W_i peso específico inicial (Kg/m^3)

K constante basada en el tipo de operación del vaso y en el tamaño del sedimento según:

Tipo de embalse	valores de K		
	Arena	Limo	Arcilla
Sedimentos siempre sumergidos	0	91.3	256.3
Sedimentos no siempre sumergidos	0	28.8	134.6
Embalses normalmente vacíos	0	0	0

Es evidente que aún existen varios aspectos que es necesario continuar desarrollando, sobre todo si se piensa en los prototipos. Ejemplo de ello son la irregularidad de las secciones transversales, el hecho de que la pendiente del fondo no sea única, la existencia de ampliaciones y reducciones, el efecto de un tren de avenidas, la posible resuspensión del material del fondo por el paso de las corrientes de densidad, etc. Sin embargo, se estima que el trabajo realizado es la base para continuar el estudio de esos aspectos.

También es necesario recordar que el trabajo desarrollado, es solamente una parte del problema total de sedimentación presentado en el segundo capítulo, y que por ende existen otros aspectos igualmente importantes (relacionados con las corrientes de densidad) que deben ser atendidos, tales como el empleo de diques sumergidos para encauzar al sedimento, obras de desfogue, etc.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales observaciones son las siguientes.

a) En el capítulo 2, se propone una metodología general para abordar los problemas de sedimentación, donde se contemplan los diferentes aspectos que intervienen, y en el cual se muestra la necesidad y aplicabilidad del trabajo experimental desarrollado.

b) El sedimento que llega a un embalse puede dividirse en dos grandes grupos, uno de material "grueso" que generalmente se deposita a la entrada del vaso formando un delta, y otro de material "fino", que viaja en suspensión dentro del vaso como una turbidez generalizada o como una corriente de densidad. Para el primer caso existen diferentes trabajos que permiten determinar la evolución del material grueso,

pero para el segundo, la información y el avance teórico es muy limitado, de aquí la necesidad de realizar este trabajo.

c) La descripción general del movimiento del material en suspensión dentro de un embalse, observada en el dispositivo físico de experimentación, puede resumirse de la siguiente forma al penetrar la corriente (río) al vaso, se forma una zona denominada de inmersión donde ocurre el mezclado del agua entrante con la almacenada. En esta zona, el sedimento en suspensión viaja ocupando toda la sección transversal, hasta alcanzar una cierta distancia, en la cual repentinamente aparece una corriente de densidad (generalmente por el fondo) que continuará viajando por el vaso hasta detenerse o llegar a la cortina.

d) Inicialmente se intentó analizar el comportamiento del sedimento en suspensión empleando análisis dimensional y superficies de respuesta, pero éstas técnicas solo ofrecieron resultados parciales; luego se realizó un análisis de varianza y a partir de ello, fué posible proponer un modelo teórico que permitió mejorar la interpretación de los resultados experimentales.

e) En la zona de inmersión (en las pruebas realizadas) el mezclado de la corriente entrante con el agua almacenada es, en la mayor parte de los casos, muy intenso, por lo cual se observa una gran dilución del sedimento entrante. Esto

implica que la concentración del sedimento en suspensión dentro del vaso disminuye y por lo tanto la corriente de densidad que pueda formarse tendrá una concentración baja. Sin embargo los resultados de este trabajo indican que para los casos reales, es muy probable que ésta concentración sea similar a la de entrada (ec. 8.17), pues en los embalses reales la penetración del río ocurre generalmente en régimen lento.

f) Existen situaciones donde las corrientes de densidad no llegan a formarse. Esto dependerá de la evolución del sedimento en la zona de inmersión. Generalmente esto ocurre cuando las concentraciones son bajas (2 gr/l) y se acentúa cuando existe una estratificación de temperaturas importante en el vaso. Cuando no se forman las corrientes de densidad, el sedimento continuará viajando dentro del vaso como una turbidez generalizada.

g) Las pruebas realizadas indican que existe una condición crítica $(MY)_c$, en la cual el sedimento en la zona de inmersión, no puede continuar viajando ocupando toda la sección transversal, y es cuando ocurre la formación de una corriente de densidad (ec. 6.10).

h) Las corrientes de densidad pueden viajar por el fondo, por alguna zona intermedia, o por la superficie del vaso, esto dependerá de la estratificación de temperaturas y de la

concentración de la corriente entrante.

i) Las corrientes que viajan por la superficie, ocurren cuando la densidad del agua embalsada (fría) es mayor que la del agua entrante (concentración baja).

j) Las corrientes que viajan por alguna zona intermedia, se presenta en embalses que tienen estratificación de temperaturas. Sin embargo, cuando la concentración de entrada es mayor de 3 gr/l, las corrientes siempre viajarán por el fondo independientemente de la estratificación.

k) En las pruebas realizadas, las corrientes que penetraban por alguna zona intermedia, generalmente lo hacían donde la temperatura era de 15°C, siendo que los perfiles de estratificación variaban de 5°C en el fondo a 20°C en la superficie.

l) La presencia de curvas en el cauce produce corrientes de densidad mas lentas y disminuye el mezclado de la corriente.

m) La estratificación de temperaturas influye en la posición por donde penetran las corrientes de densidad, pero no en la longitud recorrida. Esto implica que las zonas de depósito son similares en un embalse independientemente de la estratificación.

n) De acuerdo con los resultados experimentales, se ha propuesto una teoría y un procedimiento de cálculo sencillo (cap 6), que ha permitido simular satisfactoriamente la evolución de las pruebas del laboratorio (cap 7).

ñ) Se ha planteado una metodología para predecir el comportamiento del sedimento en los prototipos (cap. 8), basada principalmente en la teoría de modelos para flujos estratificados. Aunque no se dispone de información de campo para comprobar dicha extrapolación, se estima que por lo general del procedimiento teórico propuesto y la corroboración experimental realizada, la teoría puede aplicarse a prototipos.

o) No es posible realizar una comparación clara del material presentado en este trabajo, con el de otros autores, pues además de ser escasa la información al respecto, la mayor parte trata el problema de las corrientes de densidad, considerando que la diferencia de densidad es debida a la presencia de sal o por temperatura pero no por materiales sedimentables.

Las recomendaciones generales que pueden hacerse son las siguientes.

a) Es necesario desarrollar un procedimiento para medir velocidades y concentraciones puntuales, en el transcurso

del tiempo, y simultáneamente en diferentes sitios del recorrido del sedimento en suspensión.

b) Se requiere de profundizar más sobre el concepto de la condición crítica $(MY)_c$. Para ello es necesario estudiar la relación entre la carga de sedimento en suspensión y la distribución de velocidades cuando el régimen es gradualmente variado.

c) La evolución de la curva de recesión de una corriente de densidad, debe ser mejor representada analíticamente, para lo cual sería conveniente realizar mediciones más precisas.

d) Es necesario realizar pruebas para determinar la influencia del sedimento depositado en el tránsito de nuevas corrientes de densidad (trenes de avenidas).

e) Convendría instrumentar algún(os) prototipo para determinar la evolución del sedimento en su interior, o al menos realizar mediciones sistemáticas de entradas de sedimento a un vaso y sondeos regulares del sedimento depositado. Esto permitiría evaluar los resultados del trabajo aquí presentado.

f) Realizar investigación sobre la posible extracción del sedimento en suspensión, a través de las obras de toma o descargas profundas de una presa. Esto evidentemente deberá

estar aunado al diseño de estructuras sumergidas (v.g. diques) que permitan encauzar el flujo de sedimento.

g) Continuar con el estudio de modelos físicos para analizar el comportamiento del sedimento en suspensión y su relación con los prototipos, pues debido a las grandes diferencias de escala, existen grandes interrogantes que deben contestarse para asegurar la correcta extrapolación. Nótese que en este tipo de problemas siempre será un auxiliar valioso el modelo físico, dado lo costoso de las mediciones en campo y lo difícil de realizarlas. Es evidente que en la medida en que se mejore el conocimiento de la evolución del fenómeno, y la interrelación de las diferentes variables involucradas, será posible emplear la simulación matemática para predecir el comportamiento del fenómeno, con amplias ventajas sobre el método experimental.

RECONOCIMIENTOS

A la C.F.E. y al Ing Joaquín Carrión Hernández, quién a través de un estudio encomendado al Instituto de Ingeniería permitió el desarrollo del trabajo.

Al M en I José Antonio Maza A., director de éste trabajo de tesis, por su apoyo y confianza.

Al M en I José L. Sánchez B. por su valiosa asesoría.

Al M en I Armando Díaz C y al Ing E. Gerardo Garcés F., quienes integraron el equipo humano de mediciones y posteriormente de procesamiento de la información. Al Ing. Jorge Martínez del C. por su colaboración en la primera etapa de pruebas.

A los laboratorios de Ingeniería Ambiental y de Mecánica de Suelos del II de la UNAM.

Al Instituto de Ingeniería y a la UNAM, por la formación recibida.

BIBLIOGRAFIA

1. Aki, S. y Shirasuna, T. (1977), "Numerical simulation of temperature and turbidity in reservoirs", XVII Congress of the IAHR, Baden Baden, Germany, pp. 41-48
2. Anuchin, V.N. et al (1972), "Experimental research of bed density flows under natural condition and their modelling in laboratory", International Symposium on Stratified Flows, IAHR, Novosibirsk, USSR, pp 525-532
3. Basso, E. (1977), "Métodos de medición", Curso Regional de Formación sobre Procesos de Erosión y Sedimentación en América Latina, Bogotá, Colombia
4. Bata, G. y Bogish, K. (1953), "Some observations on density currents in the laboratory and in the field", IAHR Procs Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis, U.S.A., pp 387-400
5. Bloss S y Harleman D R F (1980), "Effect of wind induced mixing on the seasonal thermocline in lakes and reservoirs", Stratified Flows, Second IAHR Symposium, Trondheim, Vol I, pp 291-300

6. Campos, A.F. (1980), "Dimensionamiento de la capacidad para sedimentos en los embalses", Tesis de Maestría, DEFFI, UNAM, México
7. Central Board of Irrigation and Power (1977), "Life of Reservoir", Technical Report No 19, New Delhi
8. Cermak J E y Sethu R S, (1977), " Simulation of density currents", River Mechanics, Vol III, Col. State University, H.W. Shen, cap 31.
9. Fukoka, S. y Fukushima, Y. (1980), "On dynamic behavior of the head of the gravity current in a stratified reservoir", Stratified Flows, Second IAHR Symposium, Trondheim, Vol I, pp 164-173
10. Gracia, J. (1986), "Estado del arte del problema de sedimentación en embalses", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, pp 79.
11. Gracia, J. (1979), "Mathematical model for simulation of delta formation and erosion downstream of a reservoir", XIV Congress on Large Dams, Vol III, pp 117-129
12. Gracia, J. y Díaz, C A. (1986), "Análisis del fenómeno de inmersión en embalses con pendiente alta", IX Congreso Nacional de Hidráulica, Gro., Mex., pp417-426

13. Graf Walter, H. (1984), "Hydraulics of reservoir sedimentation", Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Communication du Laboratoire D'hydraulique, No 51
14. Harleman, D.R. (1961), "Stratified flows", Section 26 in Handbook of Fluid Dynamics, editor in chief Streeter, V.L., McGraw-Hill Book Co, New York
15. Harper W L y Waldrop W R (1980), "Numerical hydrodynamics of reservoir stratification and density currents", Stratified Flows, Second IAHR Symposium, Trondheim, vol II, pp 1011-1020
16. Hernández Alcántara, J.V. (1982), "Estudio de las corrientes de densidad como factor en el problema de la sedimentación en embalses", Tesis de maestría, DEEFI, UNAM, México.
17. Kikkawa, H. (1978), "Reservoir sedimentation", Chapter 8 in the Procs. of the First Seminary Japanese-American on Erosion and Sedimentation, Honolulu, Hawaii, U.S.A.
18. Lowe, J. y Fox, I. (1982), "Sedimentation in Tarbela reservoir", XIV Congress on Large Dams, Brasil, Vol III, pp 317-340

19. Mukhamedov, A.M., Kulesh, N.P. y Mukhamedov, Y.S. (1972), "Origin and movement of the bottom current in the reservoir of the Nurek Power Station and its effects in the silting of the reservoir", International Symposium of Stratified Flows, IAHR, Novosibirsk, USSR, pp 541-551
20. Naomura, T. y Aki, S. (1976), "Long-Term persistence of turbid water phenomenon in Hitotsuse reservoir", XII Congreso de Grandes Presas, México, No Q47-R14, pp 813-839
21. Nizery, A. y Bonning, J. (1953), "Observations systematiques de courants de densité dans une retenue hydroélectrique", IAHR Procs. Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis, pp 369-386
22. Okada, T. y Baba, K. (1982), "Sediment release plan at Sakuma reservoir", XIV Congress on Large Dams, Vol III, pp 41-64
23. Pyrkin, Y.G. y Samoliubov, B.I. (1978), "In situ investigations of underflow density currents in the presence of bottom erosion", Water Resources, Vol 5, No 6, pp 866-876
24. Rausch, D.L. y Heinemann, H.G. (1975), "Controlling reservoir trap efficiency", U.S. Dep. of Agric., Agric. Res. Serv., Columbia, Vol 18, No 6, pp 1105-1108

25. Rooseboom, A. y Annandale, W. (1982), "Sediment movement through reservoirs", XIV Congress on Large Dams, Vol III, pp 373-381

26. Science and Education Administration, USDA (1978), "Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning", USDA, Agriculture Handbook, No 537

27. Singh, B. y Shah, C.R. (1971), "Plunging phenomenon of density currents in reservoirs", La Houille Blanche, Vol 196, No 1, France, pp 59-64

28. Stefan, H. (1973), "High concentration turbidity currents in reservoir", XV Congress of IAHR, vol I, Istanbul, Turkey, pp A44 1- A44 12

29. Takasu, S. (1982), "Hydraulic design an model test sediment release facility of Unazuki dam", XIV Congress on Large Dams, Vol 196, No.1, France, pp59-64

30. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation (1974), "Design of Small Dams", Appendix H-Sedimentation, U.S. Gov. Printing Office, Washington, U.S.A., pp 767-795

31. Vanoni Vito, A. (1977), "Sedimentation Engineering", ASCE-Manuals and Reports on Engineering, Practice No 54, New

York

32. Yih, C.S. (1980), "Interplay and competition of forces in stratified flows", Stratified Flows, Second IAHR Symposium, Trondheim, Vol I, pp 17-39

APENDICE A
(Parámetros principales en las pruebas realizadas)

ETAPA I M Y (x.001) (m)

CAOLIN	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	3.20	4.60	14.60	6.60	13.00	5.10
S2	4.80	4.30	6.70	6.60	9.30	10.40
S3	4.70	5.00	4.80	7.90	12.00	7.80

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA I M Y (X.001) (m)

CENIZA	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	3.67	3.10	7.70	7.90	6.90	5.20
S2	7.00	4.30	8.80	9.70	11.00	9.90
S3	7.00	4.90	7.00	6.70	11.10	11.70

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA II M Y (m)

		C1	C2	C3
E1	Q1	0.0033	0.0043	0.0130
	Q2	0.0110	0.0088	0.0170
E2	Q1	0.0040	0.0054	0.0058
	Q2	0.0110	0.0113	0.0130

E1 : 5-5, E2 : 5-20, C1 : 1/2, C2 : 1, C3 : 2, Q1 : 1/4, Q2 : 1

E en grados centígrados
 C en gramos por litro
 Q en litros por minuto

ETAPA III M Y (m)

Estratif.	Conc.	Desc. de fondo.		Desc. intermedia.		Desc. de fondo.	
		Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2
E1	C1	.006	.0081	.0059	.0046	.0087	.006
E1	C2	.0072	.0038	.0051	.0052	.005	.0044
E2	C1	.0058	.0041	.0057	.0051	.0082	.0036
E2	C2	.0046	.0039	.0051	.0034	.0036	.0045
E3	C1	.005	.0056	.0057	.0036	.0057	.0067
E3	C2	.0056	.0038	.0054	.0028	.0041	.0035
E4	C1	.0088	.0078	.0067	.005	.0074	.0068
E4	C2	.0068	.0039	.0041	.0036	.0051	.0047

E1:(5-5), E2:(5-12), E3:(5-20), E4:(20-20), Q1:(1/4), Q2:(1), C1:(1/2), C2:(2)

E en grados centígrados
 Q en litros por minuto
 C en gramos por litro

ETAPA IV M Y (m)

	C1		C2		C3		C4	
	MC	MB	MC	MB	MC	MB	MC	MB
E1	0.78	0.64	0.77	0.68	0.75	0.71	0.80	0.76
E2	0.75	0.69	0.73	0.72	0.82	0.82	0.85	0.82

E1 : 5-5, E2 : 20-20, C1 ; 1/2, C2 : 2, C3 : 5, C4 : 10

multiplicar los números de esta tabla por .001

E en grados centígrados

C en gramos por litro

MC Caolín

MB Mat. Balsas

ETAPA V M Y (m)

	C = 1/2	C = 2	C = 5	C = 10
Q = 1/4	0.0113	0.0140	0.0086	0.0088
Q = 1/2	0.0143	0.0125	0.0113	0.0106
Q = 1	0.0160	0.0105	0.0120	0.0138

Q en lt/min

C en gr/lt

ETAPA I LONGITUD AVANZADA AL CORTE (m)

CAOLIN	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	1.48	0.98	1.17	1.15	1.25	1.26
S2	1.60	1.57	1.35	1.50	1.04	1.15
S3	2.35	2.38	1.45	1.82	1.03	1.28

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA I LONGITUD AVANZADA AL CORTE (m)

CENIZA	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	1.30	1.26	1.04	1.37	1.30	1.25
S2	1.62	1.90	1.29	1.47	1.09	1.10
S3	1.72	2.14	1.45	1.77	1.05	1.14

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA II LONGITUD AVANZADA AL CORTE (m)

		C1	C2	C3
E1	Q1	1.46	1.45	1.15
	Q2	1.14	1.31	0.99
E2	Q1	1.20	1.18	1.02
	Q2	1.36	1.28	1.31

E1 : 5-5, E2 : 5-20, C1 : 1/2, C2 : 1, C3 : 2, Q1 : 1/4, Q2 : 1

E en grados centígrados
 C en gramos por litro
 Q en litros por minuto

ETAPA III LONGITUD AVANZADA AL CORTE (m)

Estratif.	Conc.	Desc. de fondo.		Desc. intermedia.		Desc. de fondo.	
		Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2
E1	C1	.82	.65	.86	.78	.82	.85
E1	C2	.94	.68	.70	.77	.87	.81
E2	C1	.88	.63	.84	.72	.81	.84
E2	C2	.89	.65	.76	.69	.74	.80
E3	C1	1.03	.74	.80	.75	.86	.78
E3	C2	.68	.70	.89	.79	.84	.82
E4	C1	.68	.71	.72	.75	.84	.82
E4	C2	1.20	.74	.97	.73	1.13	.82

E1:(5-5), E2:(5-12), E3:(5-20), E4:(20-20), Q1:(1/4), Q2:(1), C1:(1/2), C2:(2)

E en grados centígrados
 Q en litros por minuto
 C en gramos por litro

ETAPA IV LONGITUD AVANZADA AL CORTE (m)

	C1		C2		C3		C4	
	MC	MB	MC	MB	MC	MB	MC	MB
E1	0.78	0.64	0.77	0.68	0.75	0.71	0.80	0.76
E2	0.75	0.69	0.73	0.72	0.82	0.82	0.85	0.82

E1 : 5-5, E2 : 20-20, C1 : 1/2, C2 : 2, C3 : 5, C4 : 10

E en grados centígrado

C en gramos por litro

MC Caolín

MB Mat. Balsas

ETAPA V Longitud al momento de corte (m)

	C = 1/2	C = 2	C = 5	C = 10
Q = 1/4	0.83	0.90	0.99	1.00
Q = 1/2	0.79	0.92	0.96	0.92
Q = 1	0.87	0.95	1.04	0.98

Q en lt/min

C en gr/lt

ETAPA I LONGITUD AVANZADA A 1.5Tc (m)

CAOLIN	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	1.69	1.18	1.40	1.31	1.43	1.65
S2	2.16	1.98	1.80	1.95	1.32	1.47
S3	----	----	2.11	----	1.51	1.88

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA I LONGITUD AVANZADA A 1.5Tc (m)

CENIZA	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	1.48	1.52	1.20	1.66	1.45	1.48
S2	2.24	----	1.63	2.14	1.30	1.38
S3	2.28	----	2.04	----	1.34	1.70

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA II LONGITUD AVANZADA A 1.5 Tc (m)

		C1	C2	C3
E1	Q1	-	-	-
	Q2	1.24	-	1.10
E2	Q1	-	-	-
	Q2	1.45	1.41	1.38

E1 : 5-5, E2 : 5-20, C1 : 1/2, C2 : 1, C3 : 2, Q1 : 1/4, Q2 : 1

E en grados centigrados
 C en gramos por litro
 Q en litros por minuto

ETAPA III LONGITUD AVANZADA A 1.5 Tc (m)

Estratif.	Conc.	Desc. de fondo.		Desc. intermedia.		Desc. de fondo.	
		Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2
E1	C1	.91	.70	.96	.85	.97	.92
E1	C2	1.09	.72	.83	.81	.98	.85
E2	C1	1.00	.69	.97	.83	.93	.93
E2	C2	1.02	.69	.80	.73	.86	.89
E3	C1	1.17	.85	.88	.84	1.03	.87
E3	C2	.80	.75	.96	.89	.89	.93
E4	C1	.76	.79	.81	.81	.93	.88
E4	C2	1.63	.85	1.23	.87	1.30	.94

E1:(5-5), E2:(5-12), E3:(5-20), E4:(20-20), Q1:(1/4), Q2:(1), C1:(1/2), C2:(2)

E en grados centígrados
 Q en litros por minuto
 C en gramos por litro

ETAPA IV LONGITUD AVANZADA A 1.5 Tc (m)

	C1		C2		C3		C4	
	MC	MB	MC	MB	MC	MB	MC	MB
E1	1.80	0.78	0.81	0.73	0.85	0.84	1.04	0.94
E2	0.81	0.75	0.87	0.83	0.97	0.94	1.15	1.05

E1 : 5-5, E2 : 20-20, C1 : 1/2, C2 : 2, C3 : 5, C4 : 10

E en grados centigrados

C en gramos por litro

MC Caolin

MB Mat. Balsas

ETAPA V Longitud a 1.5 Tc (m)

	C = 1/2	C = 2	C = 5	C = 10
Q = 1/4	1.04	---	1.25	1.21
Q = 1/2	0.89	1.13	1.25	1.15
Q = 1	0.98	1.07	1.22	1.19

Q en lt/min

C en gr/lt

ETAPA I MEZCLADO (M) AL CORTE

CAOLIN	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	0.51	0.79	0.61	0.77	0.52	0.57
S2.	0.42	0.48	0.53	0.44	0.69	0.61
S3	0.25	0.33	0.39	0.36	0.47	0.43

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA I MEZCLADO (M) AL CORTE

CENIZA	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	0.58	0.59	0.70	0.65	0.48	0.63
S2	0.41	0.49	0.53	0.44	0.57	0.62
S3	0.38	0.43	0.36	0.30	0.66	0.55

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA II MEZCLADO (M) AL CORTE

		C1	C2	C3
E1	Q1	0.45	0.39	0.60
	Q2	0.75	0.63	0.76
E2	Q1	0.62	0.55	0.69
	Q2	0.48	0.50	0.45

E1 : 5-5, E2 : 5-20, C1 : 1/2, C2 : 1, C3 : 2, Q1 : 1/4, Q2 : 1

E en grados centígrados
 C en gramos por litro
 Q en litros por minuto

ETAPA III MEZCLADO (M) AL CORTE

Estratif.	Conc.	Desc. de fondo.		Desc. intermedia.		Desc. de fondo.	
		Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2
E1	C1	.32	.32	.30	.24	.28	.21
E1	C2	.24	.27	.35	.24	.25	.23
E2	C1	.29	.34	.30	.31	.25	.22
E2	C2	.24	.29	.34	.28	.29	.24
E3	C1	.26	.28	.28	.28	.26	.25
E3	C2	.32	.29	.25	.24	.24	.27
E4	C1	.28	.27	.33	.25	.26	.22
E4	C2	.21	.28	.27	.25	.21	.23

E1:(5-5), E2:(5-12), E3:(5-20), E4:(20-20), Q1:(1/4), Q2:(1), C1:(1/2), C2:(2)

E en grados centígrados

Q en litros por minuto

C en gramos por litro

ETAPA IV MEZCLADO (M) AL CORTE

	C1		C2		C3		C4	
	MC	MB	MC	MB	MC	MB	MC	MB
E1	0.24	0.29	0.24	0.26	0.24	0.26	0.24	0.26
E2	0.25	0.27	0.25	0.28	0.26	0.25	0.26	0.26

E1 : 5-5, E2 : 20-20, C1 : 1/2, C2 : 2, C3 : 5, C4 : 10

E en grados centigrados

C en gramos por litro

MC Caolín

MB Mat. Balsas

ETAPA V MEZCLADO (M) AL CORTE

	C = 1/2	C = 2	C = 5	C = 10
Q = 1/4	1.00	0.84	0.93	0.92
Q = 1/2	0.99	0.96	0.95	1.00
Q = 1	0.85	0.77	0.89	0.82

Q en lt/min

C en gr/lt

ETAPA I MEZCLADO (M) AL APARECER LA CORRIENTE

CAOLIN	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	0.17	0.43	0.61	0.49	0.53	0.43
S2	0.19	0.15	0.27	0.27	0.40	0.33
S3	0.12	0.14	0.13	0.23	0.34	0.24

Q1: 1/4, Q2: 1/2, Q3:1, C1: 5, C2: 10, S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA I MEZCLADO (M) AL APARECER LA CORRIENTE

CENIZA	Q1		Q2		Q3	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
S1	0.22	0.17	0.50	0.41	0.40	0.49
S2	0.21	0.21	0.26	0.34	0.40	0.31
S3	0.19	0.20	0.19	0.18	0.27	0.31

Q1: 1/4. Q2: 1/2. Q3:1. C1: 5, C2: 10. S1: 0.02, S2: 0.04, S3: 0.06

Q en litros por minuto
C en gramos por litro

ETAPA II MEZCLADO (M) AL APARECER LA CORRIENTE

		C1	C2	C3
E1	Q1	0.31	0.34	0.76
	Q2	0.60	0.50	0.76
E2	Q1	0.38	0.32	0.70
	Q2	0.43	0.45	0.45

E1 : 5-5, E2 : 5-20, C1 : 1/2, C2 : 1, C3 : 2, Q1 : 1/4, Q2 : 1

E en grados centigrados
 C en gramos por litro
 Q en litros por minuto

ETAPA III MEZCLADO (M) AL APARECER LA CORRIENTE

Estratif.	Conc.	Desc. de fondo.		Desc. intermedia.		Desc. de fondo.	
		Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2
E1	C1	.12	.15	.115	.09	.165	.11
E1	C2	.14	.074	.10	.10	.096	.085
E2	C1	.11	.08	.11	.10	.155	.07
E2	C2	.09	.076	.10	.07	.07	.087
E3	C1	.096	.11	.11	.07	.111	.13
E3	C2	.11	.079	.12	.054	.08	.068
E4	C1	.17	.15	.13	.10	.14	.13
E4	C2	.15	.076	.08	.07	.10	.089

E1:(5-5), E2:(5-12), E3:(5-20), E4:(20-20), Q1:(1/4), Q2:(1), C1:(1/2), C2:(2)

E en grados centigrados
 Q en litros por minuto
 C en gramos por litro

ETAPA IV MEZCLADO (M) AL APARECER LA CORRIENTE

	C1		C2		C3		C4	
	MC	MB	MC	MB	MC	MB	MC	MB
E1	0.089	0.24	0.10	0.21	0.07	0.145	0.098	0.093
E2	0.098	0.135	0.07	0.08	0.096	0.087	0.098	0.099

E1 ; 5-5. E2 :20-20. C1 ; 1/2. C2 : 2. C3 : 5. C4 : 10

E en grados centigrados

C en gramos por litro

MC Caolin

MB Mat. Balsas

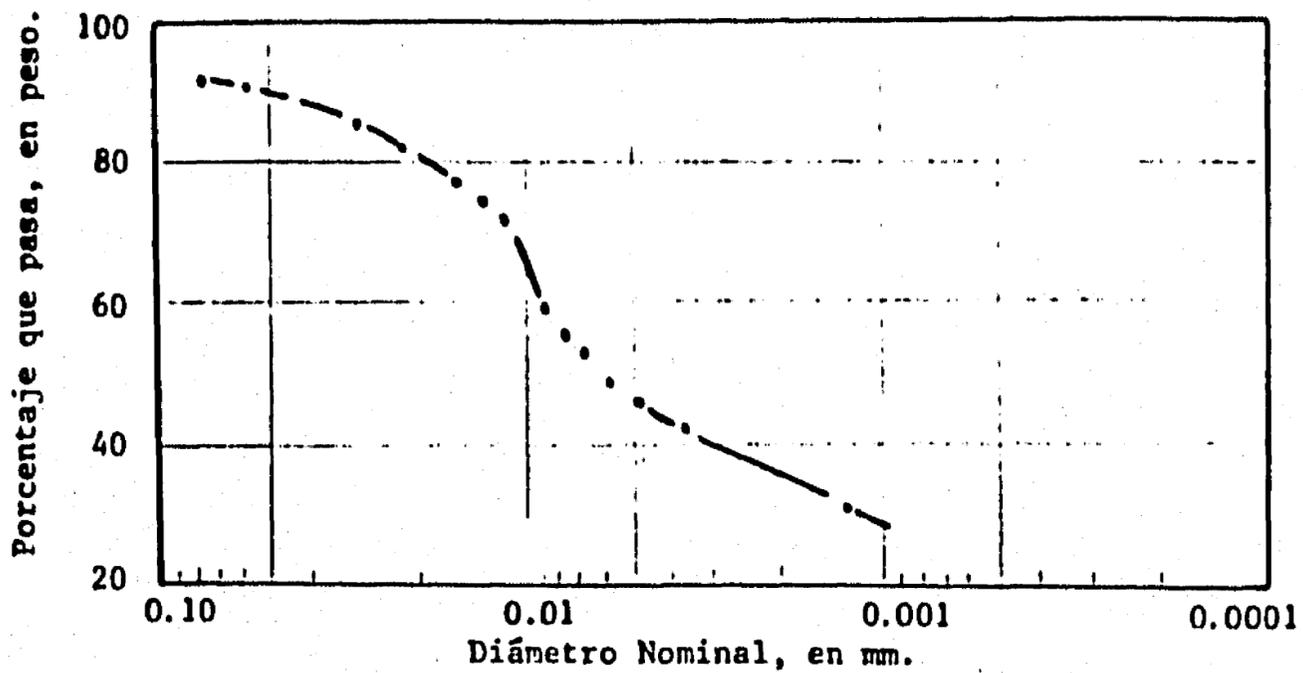
ETAPA V MEZCLADO (M) AL APARECER LA CORRIENTE

	C = 1/2	C = 2	C = 5	C = 10
Q = 1/4	0.94	0.84	0.68	0.70
Q = 1/2	0.95	0.89	0.69	0.93
Q = 1	0.82	0.64	0.76	0.80

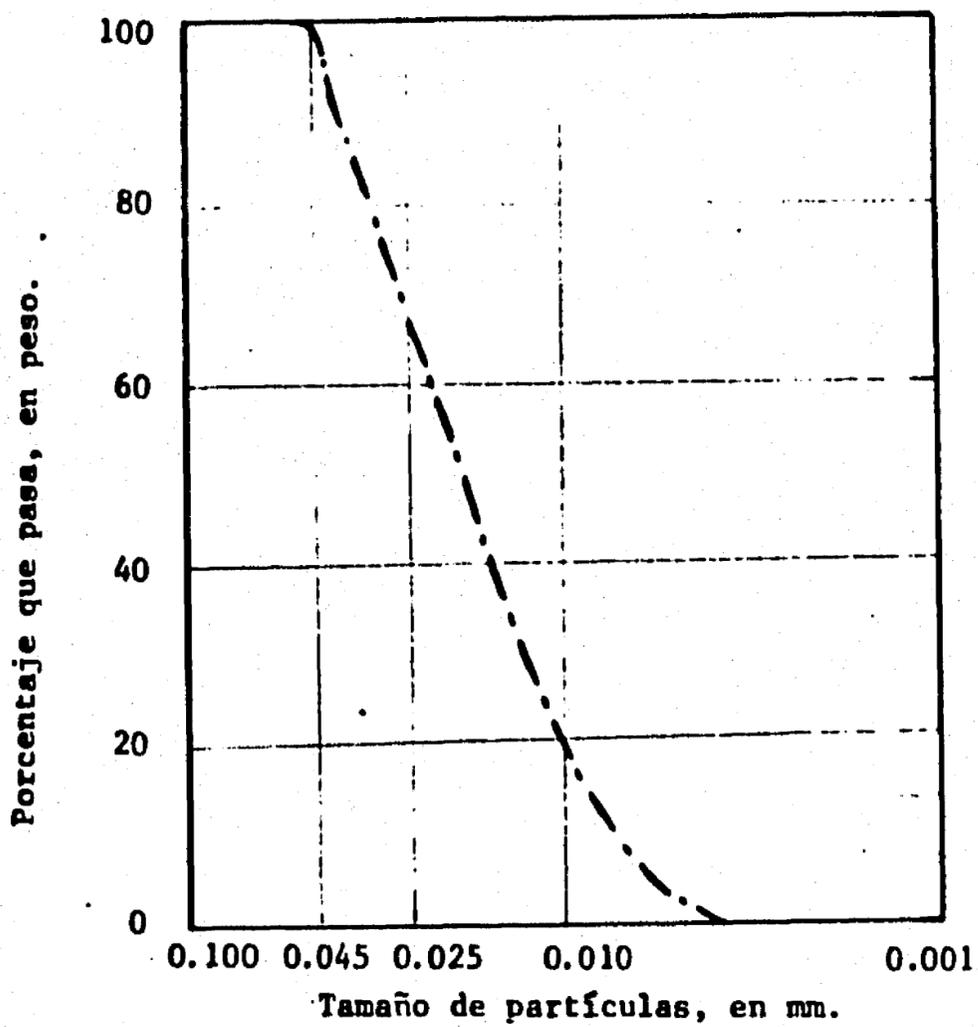
Q en lt/min

C en gr/lt

A P E N D I C E B
(Información adicional)



Curva granulométrica del caolín.



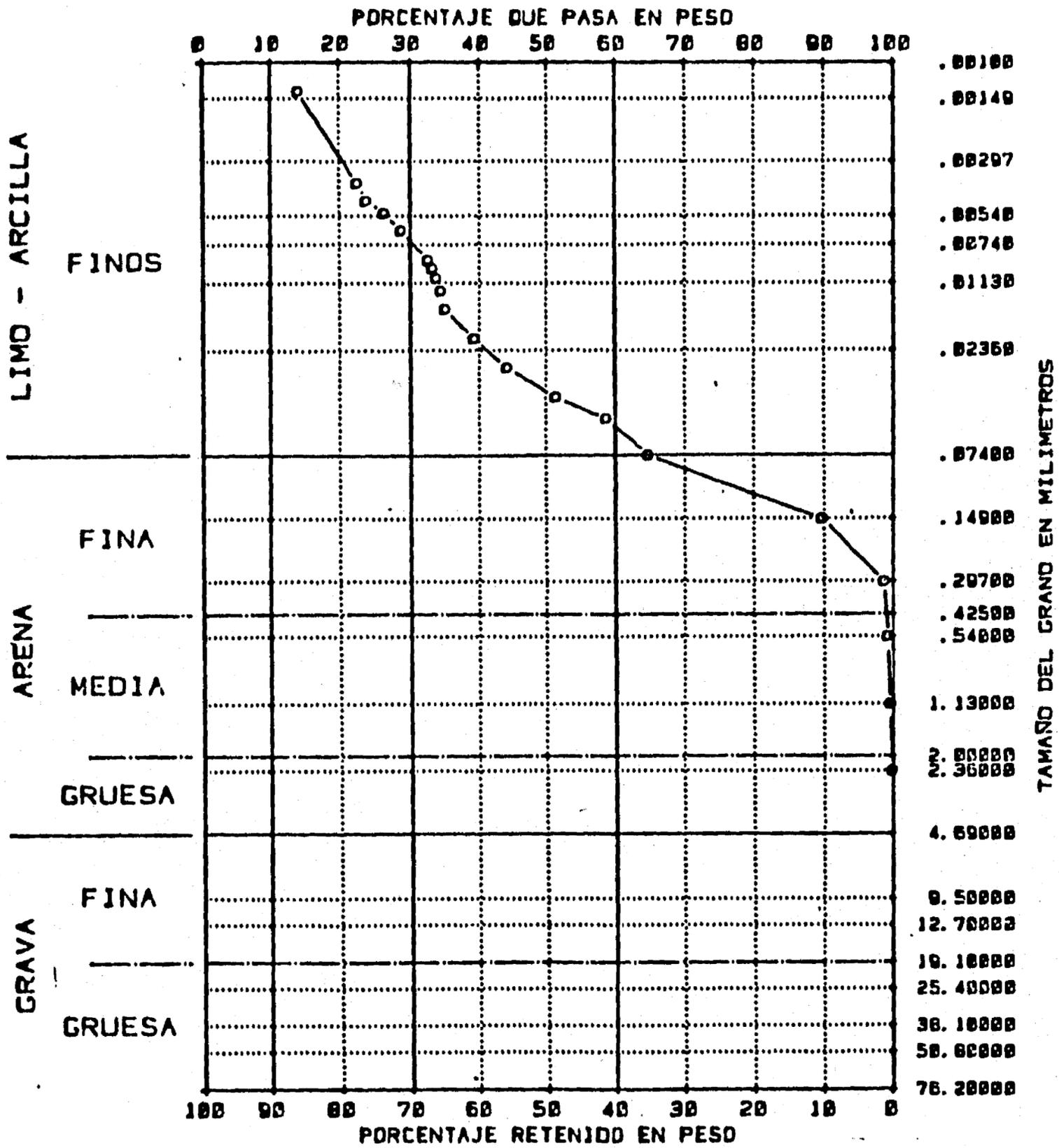
Curva granulométrica de la ceniza.

MATERIAL	PESO ESPECIFICO kg/m ³	D ₅₀ μ	C _u	σ _g
Ceniza	2170	18	2.75	1.94
Caolín	2680	6	9.00	5.00

Algunas características de los sedimentos.

C _s gr/l.	C _s m ³ /m ³	ν _m x10 ⁻⁵ kgf.s/m ²
5	0.005	10.378
10	0.010	10.506

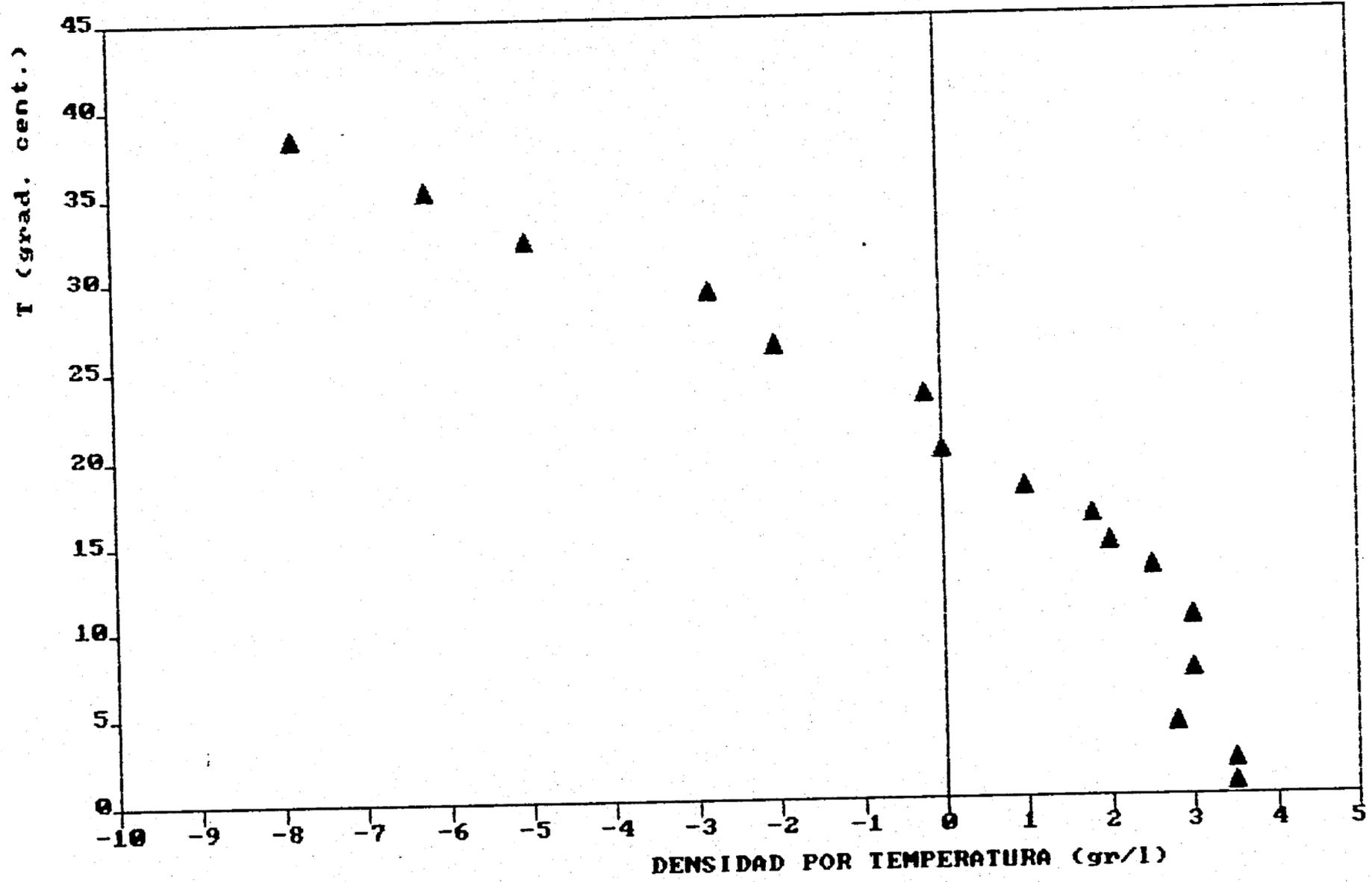
Viscosidades de la mezcla con caolín y ceniza
(T = 20°C, ν = 10.25 x 10⁻⁵ kgf.s/m²).



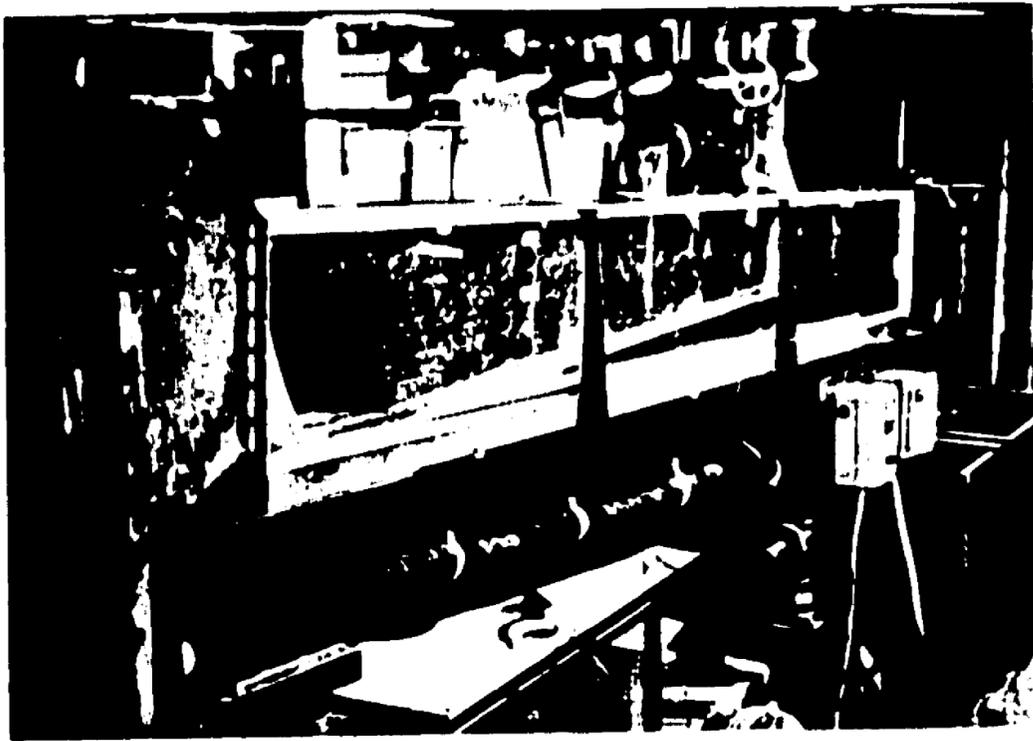
$P E = 2746 \text{ Kg/ m}^3$

Curva granulométrica del material del Balsas

RELACION TEMPERATURA-DENSIDAD DEL AGUA



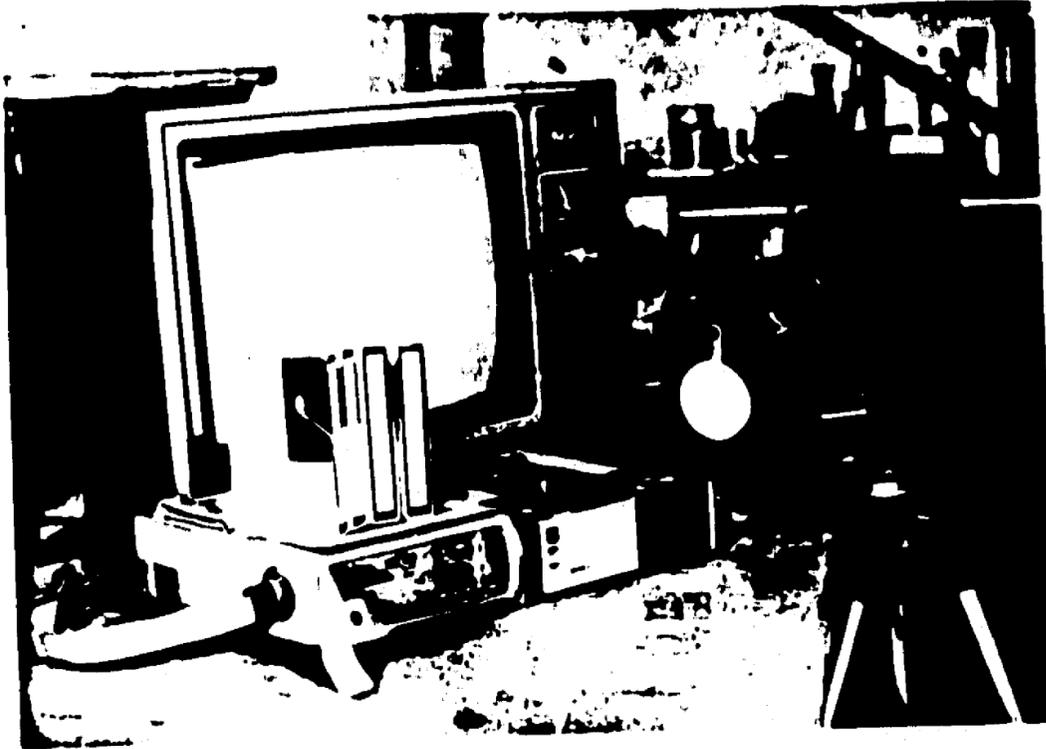
A P E N D I C E C
(Fotografías)



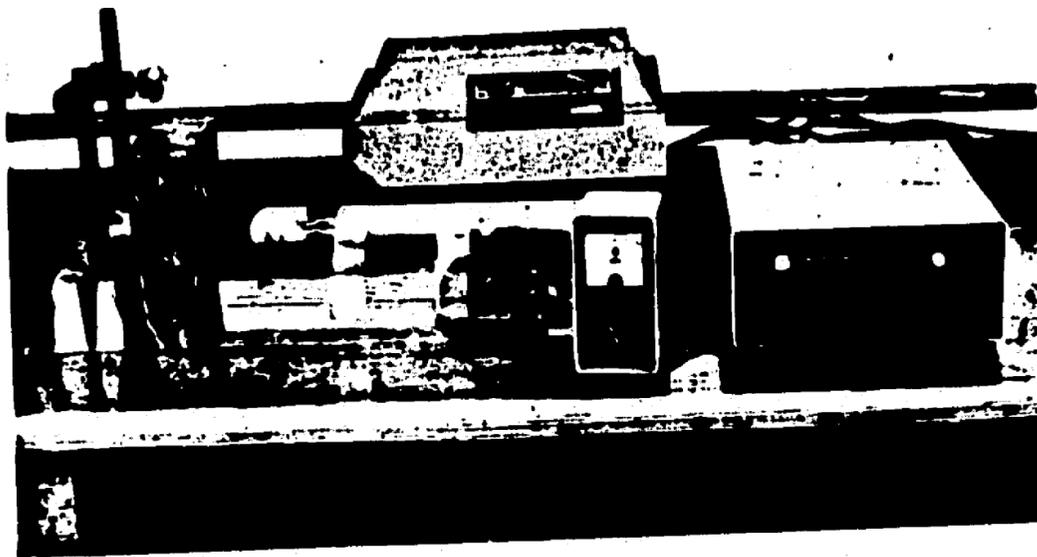
VISTA GENERAL DEL CANAL RECTO



VISTA GENERAL DEL CANAL CON CURVAS



EQUIPO DE FILMACION

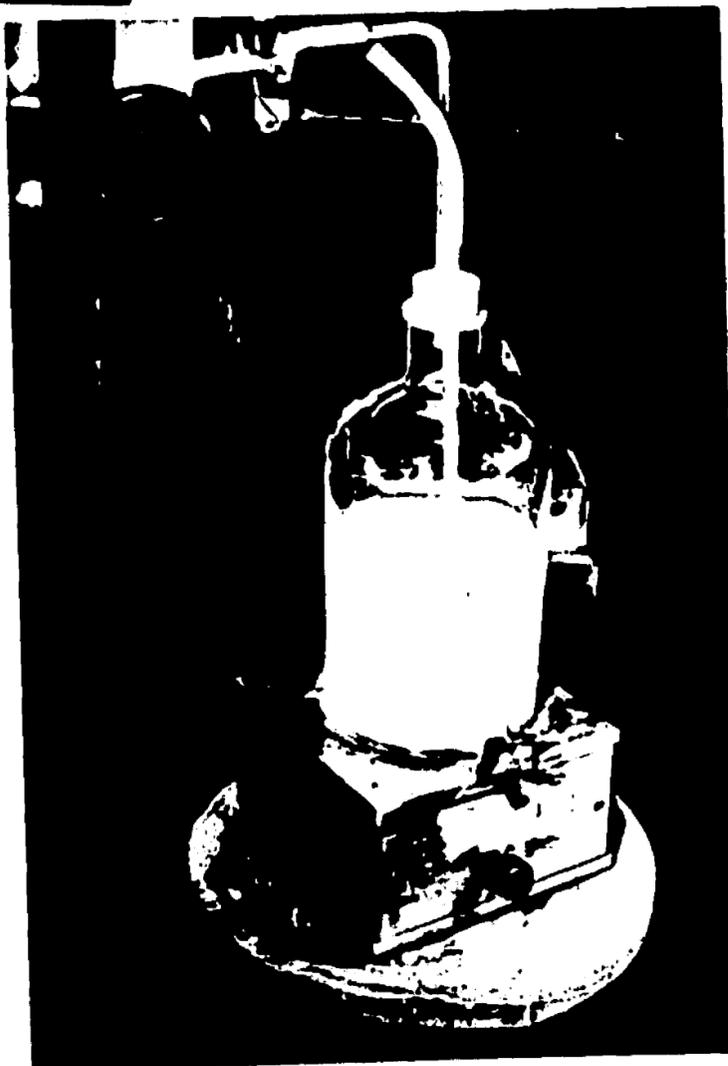


EQUIPO LASER



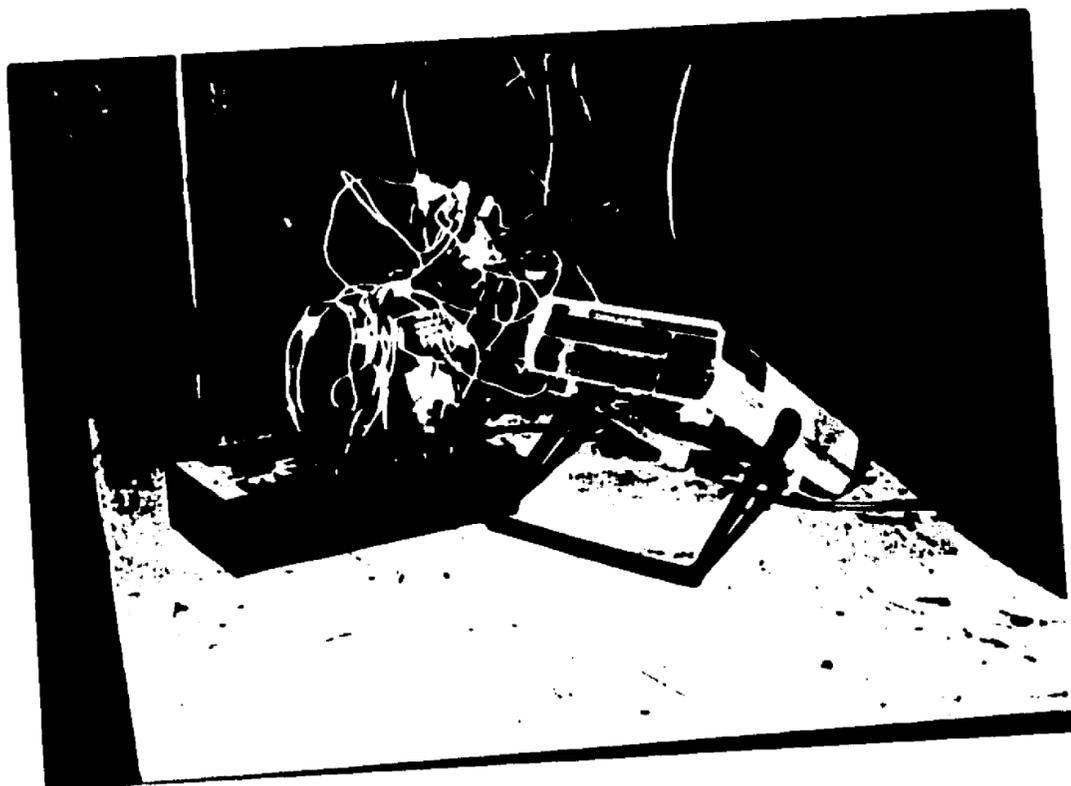
PIPETA CON MUESTRA
DE CONCENTRACION

BOTELLA DE MARIOTTE

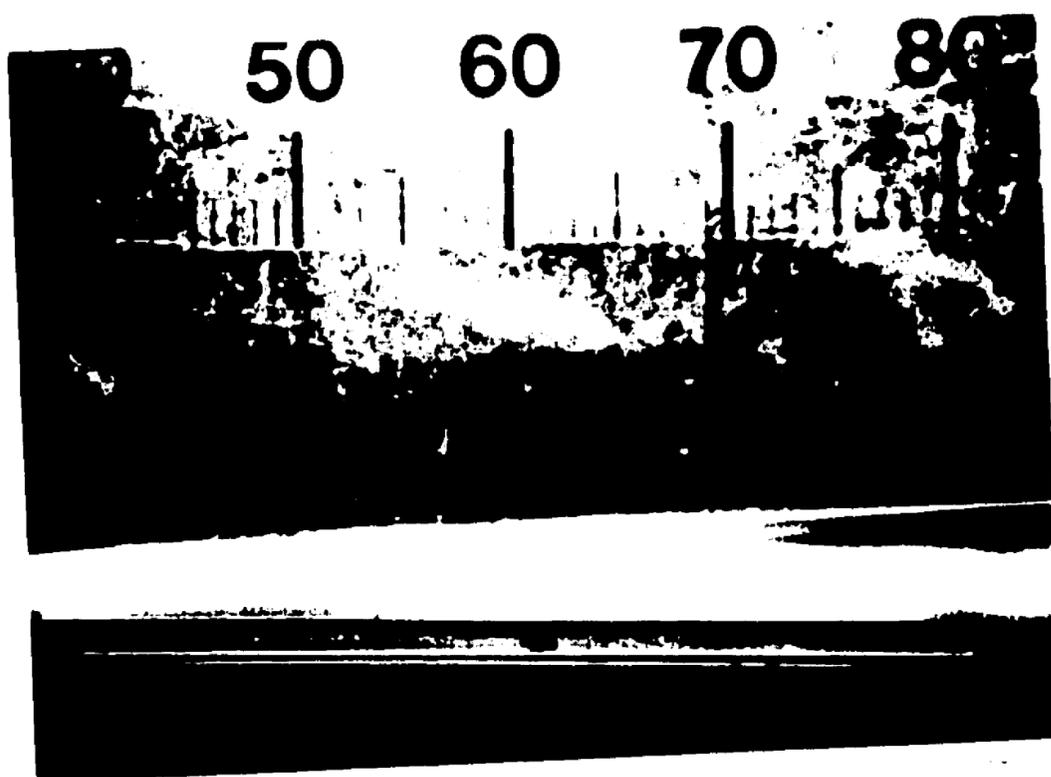
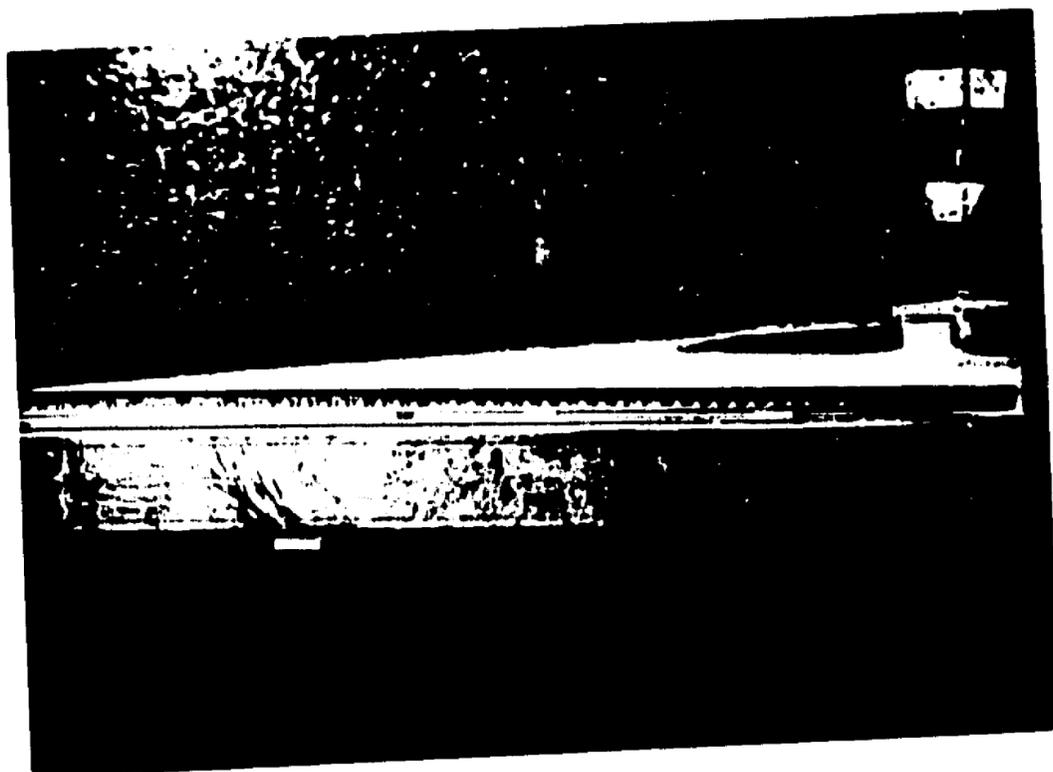




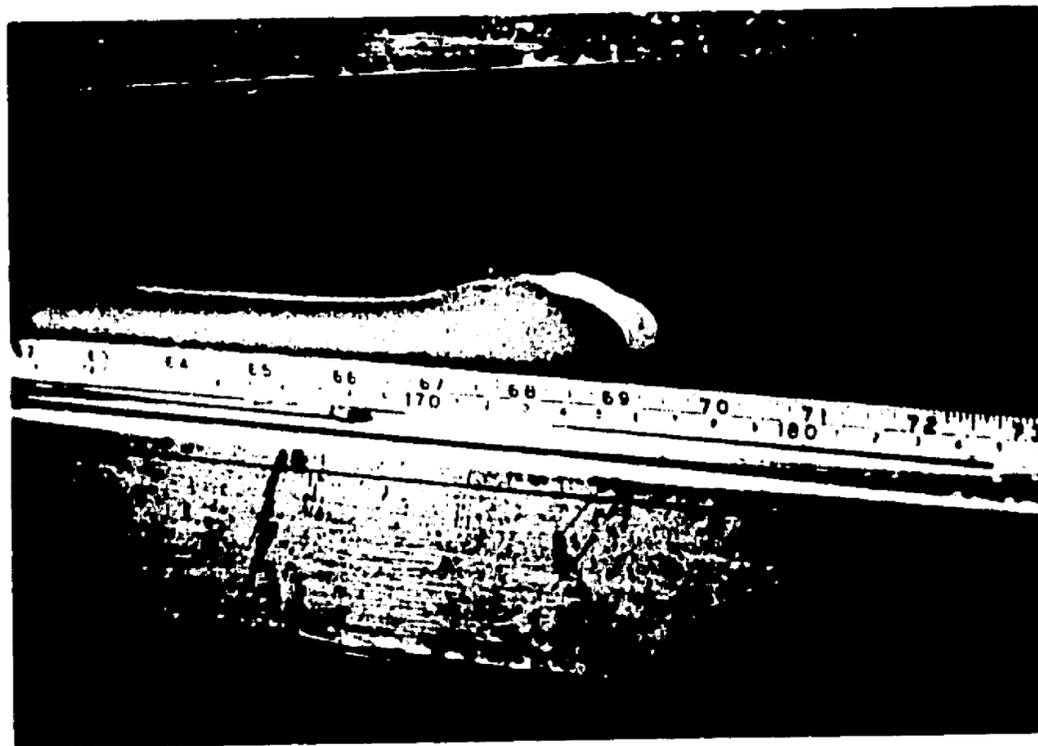
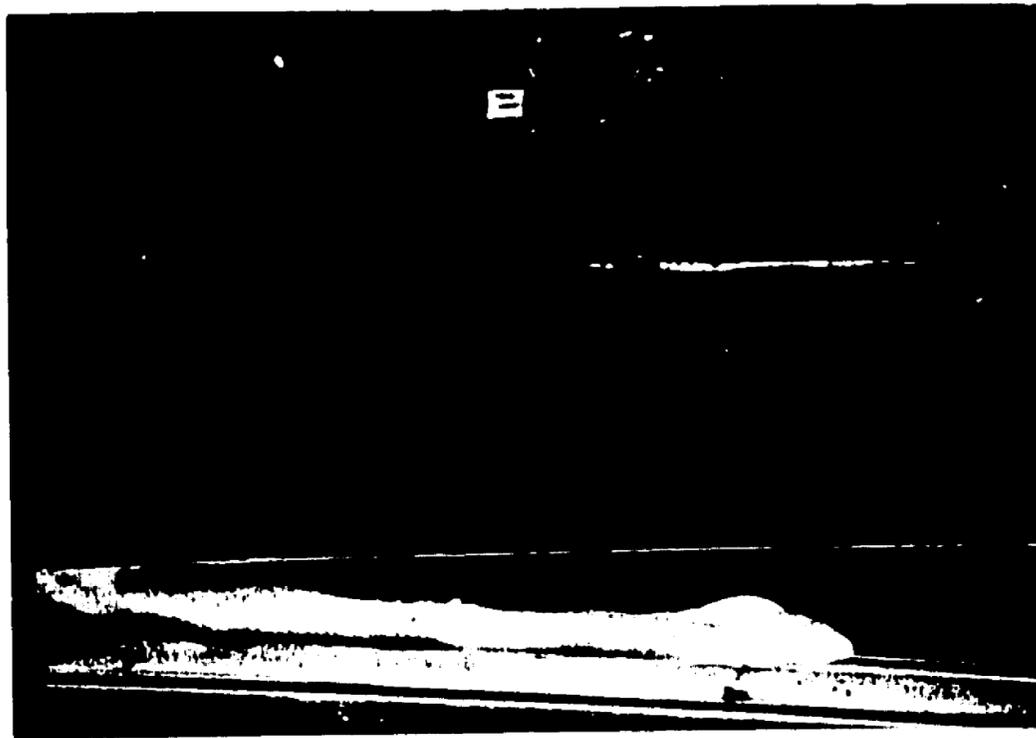
TERMOPARES



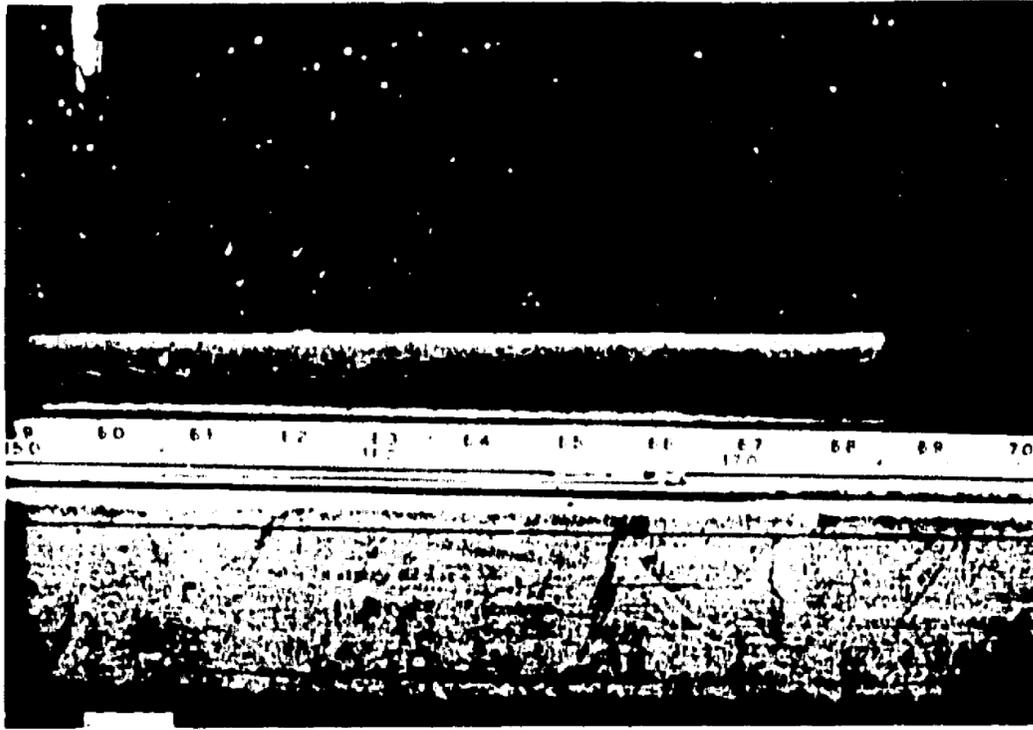
VOLMETRO, SELECTOR DE LECTURAS Y PUNTO FRIO



ZONAS DE INMERSION



CORRIENTES DE DENSIDAD DE FONDO



CORRIENTE DE DENSIDAD SUPERFICIAL



CORRIENTE DE DENSIDAD INTERMEDIA

A P E N D I C E D

(Desarrollo de la ecuación de continuidad)

Deducción de la ecuación de continuidad (6.2)

Partiendo de la ecuación (6.1), se tiene

$$-\frac{\Delta(\overline{AVC})}{\Delta X} = \frac{T \Delta(\overline{YC})}{\Delta t} \dots\dots\dots (6.2)$$

Pero como $A_j = T \gamma_j$, $A_{j+1} = T \gamma_{j+1}$ y $T=b$, se puede hacer para el miembro izquierdo de (6.2) que

$$-\frac{\Delta(\overline{AVC})}{\Delta X} = -\frac{\Delta(\overline{byVC})_{i+1} - \Delta(\overline{byVC})_i}{\Delta X} \dots\dots (E.1)$$

$$-\frac{\Delta(\overline{AVC})}{\Delta X} = -\left[\frac{(byVC)_{i+1,j+1} + (byVC)_{i+1,j}}{2\Delta X} - \frac{(byVC)_{i,j+1} + (byVC)_{i,j}}{2\Delta X} \right] \dots\dots (E.2)$$

Pero $(byVC)_{i+1,j}=0$, pues el sedimento no llega a $i+1$ en j y como

$$\overline{QCo} = cte = \frac{(byVC)_{i,j+1} + (byVC)_{i,j}}{2}$$

entonces

$$-\frac{\Delta(\overline{AVC})}{\Delta X} = -\frac{(byVC)_{i+1,j+1}}{2\Delta X} + \frac{\overline{QCo}}{\Delta X} \dots\dots (E.3)$$

Para el miembro derecho de (6.2) se tiene que:

$$\frac{b\Delta(\overline{YC})}{\Delta t} = \frac{b(\gamma C)_{i,j+1} + b(\gamma C)_{i+1,j+1}}{2\Delta t} - \frac{b(\gamma C)_{i,j} + b(\gamma C)_{i+1,j}}{2\Delta t} \dots\dots\dots (E.4)$$

Como también $b(yC)_{i+1,j} = 0$, y

$$\frac{b(yC)_{i,j+1} + b(yC)_{i+1,j+1}}{2} = \bar{b}\bar{y}\bar{C} \dots\dots (E.5)$$

Sustituyendo (E.5) en (E.4) se tiene

$$\frac{b\Delta(\bar{y}\bar{C})}{\Delta t} = \frac{\bar{b}\bar{y}\bar{C}}{\Delta t} - \frac{(yC)_{i,j}}{2\Delta t} \dots\dots (E.6)$$

Sustituyendo (E.6) y (E.3) en (6.2), se tiene

$$\frac{\bar{Q}C_0}{\Delta X} - \frac{(byVC)_{i+1,j+1}}{2\Delta X} = \frac{\bar{b}\bar{y}\bar{C}}{\Delta t} - \frac{b(yC)_{i,j}}{2\Delta t} \dots\dots (E.7)$$

Agrupando términos

$$\frac{\bar{Q}C_0}{\Delta X} - \frac{\bar{b}\bar{y}\bar{C}}{\Delta t} = \frac{(byVC)_{i+1,j+1}}{2\Delta X} - \frac{b(yC)_{i,j}}{2\Delta t} \dots\dots (E.8)$$

En el miembro derecho de la ecuación anterior, como

$(b,C)_{i+1,j+1} = (bC)_{i,j}$ y simplificando se tiene

$$\frac{y_{i+1,j+1} V_{i+1,j+1}}{\Delta X} - \frac{y_{i,j}}{\Delta t} \dots\dots (E.9)$$

Multiplicando y dividiendo por ΔX el segundo factor

$$\frac{y_{i+1,j+1} V_{i+1,j+1}}{\Delta X} - \frac{y_{i,j}}{\Delta X} \frac{\Delta X}{\Delta t} \dots\dots (E.10)$$

pero

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{V_{i,j} + V_{i+1,j+1}}{2} \dots\dots (E.11)$$

y como

$$V_{i+1,j+1} = \frac{y_{i,j} V_{i,j}}{y_{i+1,j+1}} \dots\dots (E.12)$$

Sustituyendo (E.11) y (E.12) en (E.10)

$$\frac{y_{i+1,j+1} V_{i+1,j+1}}{\Delta X} - \frac{y_{i,j}}{\Delta X} \left[\frac{V_{i,j}}{2} + \frac{y_{i,j} V_{i,j}}{2 y_{i+1,j+1}} \right] \dots (E.13)$$

factorizando $y_{i,j} V_{i,j}$ del segundo término

$$\frac{y_{i+1,j+1} V_{i+1,j+1}}{\Delta X} - \frac{y_{i,j} V_{i,j}}{\Delta X} \left[\frac{1}{2} + \frac{y_{i,j}}{2 y_{i+1,j+1}} \right] \dots (E.14)$$

En un embalse se tiene que

$$y_{i+1,j+1} = y_{i,j} - S_0 \Delta X$$

$$\frac{y_{i+1,j+1} V_{i+1,j+1}}{\Delta X} - \frac{y_{i,j} V_{i,j}}{\Delta X} \left[\frac{1}{2} + \frac{y_{i,j}}{2(y_{i,j} - S_0 \Delta X)} \right] \dots (E.15)$$

Aceptando que $S_0 \Delta X$ es despreciable, la ecuación (E.15)

se puede escribir

$$\frac{y_{i+1,j+1} V_{i+1,j+1}}{\Delta X} - \frac{y_{i,j} V_{i,j}}{\Delta X} = 0 \dots \dots \dots (E.16)$$

y como $(yV)_{i+1,j+1} = (yV)_{i,j}$, la ecuación (E.16) es nula, entonces la ecuación (E.8) puede expresarse como

$$\frac{\overline{QCo}}{\Delta X} = \frac{b\overline{yC}}{\Delta t} \dots \dots \dots (E.17 \text{ ó } 6.2)$$

A P E N D I C E E

(Datos y mediciones de las pruebas realizadas)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Etapa	Prueba	Forma del canal	Temperatura del agua en balsada (°C)	Material	Pendiente	Gasto (l/min)	Tiempo de corte del gasto (seg)	Concentración de entrada (gr/l)	Zona de inmersión (cm)	Tirante promedio de la Cod. (cm)
1	1	Recto	20	Caolín	0.02	0.50	118	5	85	1.5
"	2	"	"	"	"	"	106	10	75	1.3
"	3	"	"	Ceniza	"	"	127	5	72	1.2
"	4	"	"	"	"	"	116	10	72	1.1
"	5	"	"	"	"	0.25	227	5	80	1.2
"	6	"	"	"	"	"	251	10	70	1.0
"	7	"	"	Caolín	"	"	218	5	95	1.5
"	8	"	"	"	"	"	198	10	-	-
"	9	"	"	"	"	"	248	10	85	1.2
"	10	"	"	"	"	1.0	64	5	80	1.4
"	11	"	"	"	"	"	61	10	78	1.4
"	12	"	"	Ceniza	"	"	65	5	73	1.0
"	13	"	"	"	"	"	61	10	70	1.0
"	14	"	"	Caolín	0.04	"	54	5	50	1.1
"	15	"	"	"	"	"	60	10	45	1.0
"	16	"	"	Ceniza	"	"	59	5	40	1.0
"	17	"	"	"	"	"	58	10	40	1.0
"	18	"	"	Caolín	"	0.25	231	5	53	1.3
"	19	"	"	"	"	"	240	10	50	1.2
"	20	"	"	Ceniza	"	"	281	5	-	-
"	21	"	"	"	"	"	200	5	55	1.3
"	22	"	"	"	"	"	222	10	45	1.1
"	23	"	"	Caolín	"	0.50	108	5	47	1.3
"	24	"	"	"	"	"	121	10	55	1.3
"	25	"	"	Ceniza	"	"	116	5	50	1.4
"	26	"	"	"	"	"	122	10	50	1.1
"	27	"	"	Caolín	0.06	"	115	5	40	1.4
"	28	"	"	"	"	"	116	10	40	1.2
"	29	"	"	Ceniza	"	"	109	5	47	1.4
"	30	"	"	"	"	"	117	10	45	1.1
"	31	"	"	Caolín	"	0.25	201	5	45	1.5
"	32	"	"	"	"	"	234	10	42	1.0
"	33	"	"	Ceniza	"	"	248	5	40	1.3

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	OBSERVACIONES
L O N G I T U D A V A N Z A D A (m)											
$t/t_c = 0.25$	0.50	0.75	1.0	1.25	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
-	0.92	1.03	1.17	1.24	1.40	1.55	1.65	1.73	1.78		
-	0.80	1.00	1.15	1.25	1.31	1.41	1.47	1.52	1.55		
0.78	0.89	0.95	1.04	1.12	1.20	1.36	1.46				
-	1.04	1.19	1.37	1.53	1.66	1.83	1.94				
0.88	1.08	1.20	1.30	1.40	1.48	1.56					
-	0.90	1.10	1.26	1.40	1.52	1.67					
-	1.16	1.32	1.48	1.60	1.69						
-	0.70	0.85	0.98	1.08	1.18	1.30					Se repitió
-	1.00	1.20	1.25	-	1.43	1.57	1.68	1.77	-	1.90	
-	1.00	1.12	1.26	-	1.65	1.95	2.17	2.32	-	2.46	
-	1.10	1.20	1.30	1.38	1.45	1.54	1.62	1.68	1.72	1.75	
-	0.90	1.08	1.25	1.38	1.48	1.67	1.79	1.91	1.98	2.03	
-	0.78	0.90	1.04	-	1.32	1.62	1.90	2.10	-	2.35	
-	0.85	1.00	1.15	-	1.47	1.75	2.03	2.17	-	2.33	
-	0.85	0.96	1.09	1.20	1.30	1.54	1.79	1.99	2.16	2.31	
-	0.81	0.92	1.10	1.23	1.38	1.70	1.98	2.25	2.46		
0.78	1.03	1.30	1.60	1.90	2.16						
0.70	1.00	1.30	1.57	1.78	1.98	2.32					Se repitió
-	1.04	1.29	1.62	1.93	2.24						
0.77	1.13	1.50	1.90	2.28							
0.70	0.90	1.10	1.35	1.60	1.80	2.15	2.40				
0.70	0.93	1.20	1.50	1.75	1.95	2.28	2.46				
-	0.97	1.15	1.29	1.46	1.63	1.97					
-	0.90	1.16	1.47	1.83	2.14	2.28					
-	0.87	1.13	1.45	1.79	2.11						
0.67	1.01	1.40	1.82	2.22							
-	0.90	1.16	1.45	1.75	2.04						
-	0.96	1.34	1.77	2.20							
0.80	1.27	1.82	2.35								
0.81	1.40	1.93	2.38								
-	1.00	1.35	1.72	2.03	2.28						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	34	Recto	20	Ceniza	0.06	0.25	250	10	35	1.0
"	35	"	"	Caolín	"	1.0	57	5	44	1.3
"	36	"	"	"	"	"	61	10	42	1.2
"	37	"	"	Ceniza	"	"	59	5	35	1.0
"	38	"	"	"	"	"	61	10	41	0.9
"	39	"	"	"	"	"	64	10	-	-
II	1	"	5-5	Caolín	0.07	0.25	259	0.5	120	1.4*
"	2	"	"	"	"	"	235	1	135	1.5*
"	3	"	"	"	"	"	257	2	110	1.3*
"	4	"	"	"	"	1.00	60	0.5	88	1.0*
"	5	"	"	"	"	"	65	1	95	1.1*
"	6	"	"	"	"	"	68	2	-	-
"	7	"	5-20	"	"	0.25	234	0.5	100	2.0
"	8	"	"	"	"	"	238	1	116	1.4*
"	9	"	"	"	"	"	228	2	40	1.8
"	10	"	"	"	"	1.0	60	0.5	115	1.5
"	11	"	"	"	"	"	69	1	115	1.2
"	12	"	"	"	"	"	63	2	-	-
III	1	"	5	"	0	0.25	237	0.5	25	3.0
"	2	"	5-12	"	"	"	243	"	45	2.0
"	3	"	5-20	"	"	"	230	"	45	2.2
"	4	"	20	"	"	"	233	"	55	2.8
"	5	"	5	"	"	"	233	"	35	3.0
"	6	"	5-12	"	"	"	230	"	45	2.2
"	7	"	5-20	"	"	"	232	"	45	2.8
"	8	"	20	"	"	"	252	"	40	2.8
"	9	"	5	"	"	"	235	"	45	3.0
"	10	"	5-12	"	"	"	242	"	60	2.8
"	11	"	5-20	"	"	"	256	"	50	2.8
"	12	"	20	"	"	"	220	"	50	3.0
"	13	"	5	"	"	1.0	62	"	50	2.0
"	14	"	5-12	"	"	"	59	"	40	2.5
"	15	"	5-20	"	"	"	60	"	44	2.5
"	16	"	20	"	"	"	66	"	63	2.0
"	17	"	5	"	"	"	56	"	68	3.0
"	18	"	5-12	"	"	"	60	"	45	2.5

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	OBSERVACIONES
0.75	1.20	1.74	2.14								
-	-	0.86	1.03	1.25	1.51	2.00					
-	0.79	1.00	1.28	1.59	1.88	2.41					
-	0.77	0.90	1.05	1.16	1.34	1.71	2.08	2.40			
-	0.75	0.92	1.14	1.43	1.70	2.25					
0.96	1.25	1.39	1.46								Se repitió
0.96	1.22	1.35	1.45								*Tirante promedio al cortar el gasto
0.50	0.73	1.07	1.15								"
0.60	0.88	1.02	1.14	1.22	1.24	1.28					"
0.63	0.99	1.15	1.31								"
0.50	0.78	0.90	0.99	1.06	1.10	1.15	1.17	1.19			No se formó la c.d.
0.87	1.02	1.11	1.20								
0.91	1.02	1.10	1.18								
0.57	0.77	0.93	1.02	1.05							
0.58	1.04	1.24	1.36	1.43	1.45	1.51	1.54				
0.57	1.03	1.18	1.28	1.37	1.41	1.47					
0.58	1.05	1.20	1.31	1.37	1.38	1.41	1.43				No se formó la c.d.
0.47	0.61	0.69	0.82	0.89	0.91						Descarga de fondo
0.50	0.64	0.77	0.88	0.95	1.00						"
0.57	0.75	0.90	1.03	1.12	1.17						"
0.42	0.53	0.63	0.68	0.72	0.76						"
0.50	0.65	0.77	0.88	0.92	0.96						Descarga intermedia
0.51	0.63	0.73	0.84	0.91	0.97						"
0.51	0.66	0.74	0.80	0.86	0.88						"
0.47	0.57	0.64	0.72	0.78	0.81						"
0.49	0.62	0.72	0.82	0.88	0.97	1.06					Descarga superficial
0.52	0.63	0.73	0.81	0.86	0.93						"
0.55	0.64	0.76	0.86	-	1.03						"
0.52	0.67	0.77	0.84	0.89	0.93						"
0.46	0.54	0.59	0.65	0.68	0.70	0.77	0.85				Descarga de fondo
0.44	0.50	0.57	0.63	0.66	0.69	0.75					"
0.45	0.57	0.67	0.74	0.80	0.85	0.92					"
0.47	0.57	0.65	0.71	0.75	0.79	0.85					"
0.47	0.63	0.72	0.78	0.82	0.85	0.91	0.95				Descarga intermedia
0.47	0.56	0.64	0.72	0.78	0.83	0.89	0.97				"

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
III	19	Recto	5-20	Caolln	0	1.0	62	0.5	50	2.5
"	20	"	20	"	"	"	62	"	70	2.0
"	21	"	5	"	"	"	62	"	68	3.0
"	22	"	5-12	"	"	"	63	"	70	3.0
"	23	"	5-20	"	"	"	66	"	60	2.0
"	24	"	20	"	"	"	63	"	70	3.0
"	25	"	5	"	"	0.25	246	2	35	3.2
"	26	"	5-12	"	"	"	235	"	45	3.5
"	27	"	5-20	"	"	"	256	"	33	4.0
"	28	"	20	"	"	"	248	"	30	3.0
"	29	"	5	"	"	"	240	"	30	2.0
"	30	"	5-12	"	"	"	238	"	25	4.0
"	31	"	5-20	"	"	"	244	"	30	2.5
"	32	"	20	"	"	"	262	"	-	2.5
"	33	"	5	"	"	"	220	"	45	3.2
"	34	"	5-12	"	"	"	240	"	40	3.5
"	35	"	5-20	"	"	"	263	"	35	3.0
"	36	"	20	"	"	"	225	"	35	3.2
"	37	"	5	"	"	1.0	55	"	56	3.5
"	38	"	5-12	"	"	"	56	"	50	3.0
"	39	"	5-20	"	"	"	57	"	45	3.0
"	40	"	20	"	"	"	56	"	41	3.0
"	41	"	5	"	"	"	60	"	68	3.5
"	42	"	5-12	"	"	"	57	"	51	3.0
"	43	"	5-20	"	"	"	60	"	60	3.0
"	44	"	20	"	"	"	57	"	55	3.2
"	45	"	5	"	"	"	58	"	70	3.2
"	46	"	5-12	"	"	"	56	"	60	3.0
"	47	"	5-20	"	"	"	57	"	46	2.5
"	48	"	20	"	"	"	58	"	64	3.2
IV	1	"	5	"	"	"	61	5	66	3.0
"	2	"	20	"	"	"	58	5	40	2.0
"	3	"	5	"	"	"	61	10	50	3.0
"	4	"	20	"	"	"	58	10	30	2.5
"	5	"	5	Balsas	"	"	56	0.5	40	3.5
"	6	"	20	"	"	"	59	0.5	48	3.7

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	OBSERVACIONES
0.53	0.64	0.70	0.75	0.80	0.84	0.90					Descarga intermedia
0.50	0.60	0.68	0.75	0.78	0.81	0.84					"
0.63	0.72	0.78	0.85	0.90	0.92	0.96	0.98				Descarga superficial
0.60	0.70	0.78	0.84	0.89	0.93						"
0.54	0.61	0.70	0.78	0.83	0.87	0.93	1.00				"
0.55	0.67	0.76	0.82	0.86	0.88	0.90					"
0.50	0.66	0.80	0.94	1.01	1.09	1.23					Descarga de fondo
0.57	0.70	0.81	0.89	0.95	1.02						"
0.46	0.55	0.63	0.68	-	0.80						"
0.56	0.79	1.00	1.20	-	1.63						"
0.42	0.54	0.63	0.70	0.76	0.83						Descarga intermedia
0.52	0.63	0.70	0.76	-	0.80						"
0.55	0.69	0.81	0.89	-	0.96						"
0.51	0.68	0.83	0.97	1.11	1.23						" (no hay zona de inmersión)
0.50	0.64	0.76	0.87	-	0.98						Descarga superficial
0.55	0.62	0.69	0.74	0.80	0.86						"
0.62	0.71	0.77	0.84	0.88	0.89						"
0.55	0.75	0.95	1.13	1.30							"
0.48	0.58	0.64	0.68	0.70	0.72	0.77	0.84				Descarga de fondo
0.46	0.54	0.60	0.65	0.67	0.69	0.71	0.75				"
0.47	0.57	0.64	0.70	0.73	0.75	0.80					"
0.51	0.61	0.69	0.74	0.79	0.85	0.96	1.10				"
0.60	0.69	0.73	0.77	0.79	0.81	0.86	0.91	0.97	1.01	1.05	Descarga intermedia
0.50	0.58	0.65	0.69	0.72	0.73	0.75	0.77				"
0.55	0.66	0.72	0.79	0.84	0.89	0.94					"
0.48	0.58	0.65	0.73	0.80	0.87	1.00	1.12	1.22	1.32	1.40	"
0.55	0.65	0.75	0.81	0.83	0.85	0.88					Descarga superficial
0.55	0.65	0.74	0.80	0.85	0.89	0.93					"
0.51	0.62	0.73	0.82	0.88	0.92	0.98	1.02	1.03			"
0.55	0.65	0.75	0.82	0.88	0.94	1.05					"
0.50	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.95	1.05				*Tirantes promedio al cortar el gasto
0.50	0.64	0.73	0.82	0.90	0.97	1.17	1.40				"
0.50	0.59	0.69	0.80	0.91	1.04	1.25	1.45				"
0.50	0.65	0.75	0.85	0.99	1.15	1.45					"
0.45	0.51	0.57	0.64	0.71	0.78	0.89	0.98				"
0.50	0.61	0.66	0.69	0.72	0.75	0.84					"

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IV	7	Recto	5	Balsas	0	1.0	55	2	60	3.7
"	8	"	20	"	"	"	58	2	45	3.5
"	9	"	5	"	"	"	58	5	45	3.6
"	10	"	20	"	"	"	56	5	40	3.0
"	11	"	5	"	"	"	56	10	40	3.5
"	12	"	20	"	"	"	60	10	35	3.5
V	1	Curvo	20	Caolín	0.02	0.25	246	10	46	1.2
"	2	"	"	"	"	0.50	110	"	47	1.2
"	3	"	"	"	"	1.00	61	"	43	1.5
"	4	"	"	"	"	0.25	240	5	42	1.2
"	5	"	"	"	"	0.50	118	"	45	1.2
"	6	"	"	"	"	1.00	59	"	70	1.0
"	7	"	"	"	"	0.25	244	2	50	1.6
"	8	"	"	"	"	0.50	119	"	60	1.2
"	9	"	"	"	"	1.00	63	"	65	1.5
"	10	"	"	"	"	0.25	237	0.5	70	1.2
"	11	"	"	"	"	0.50	117	"	55	1.2
"	12	"	"	"	"	1.00	60	"	78	1.5

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	OBSERVACIONES
0.47	0.56	0.63	0.68	0.72	0.73	0.74					
0.50	0.58	0.65	0.72	0.77	0.83	0.94	1.04				
0.52	0.58	0.65	0.71	0.76	0.84	0.97	1.10	1.21	1.30		
0.57	0.67	0.75	0.82	0.88	0.94	1.06	1.20	1.33			
0.50	0.61	0.68	0.76	0.85	0.94	1.10	1.25	1.40			
0.50	0.63	0.72	0.82	0.93	1.05	1.27					
0.55	0.72	0.87	1.00	1.12	1.21						
0.50	0.67	0.77	0.92	1.05	1.15	1.28					
0.32	0.60	0.82	0.98	1.08	1.19	1.32	1.42	1.48	1.54	1.58	
0.46	0.77	0.84	0.99	1.14	1.25	1.40					
0.53	0.64	0.78	0.96	1.09	1.21	1.40					
0.45	0.73	0.91	1.04	1.13	1.22	1.36	1.46	1.54	1.60	1.66	
0.53	0.63	0.78	0.90	0.98							
0.50	0.63	0.78	0.92	1.03	1.13	1.31	1.42				
-	-	0.88	0.95	1.01	1.07	1.15	1.23	1.30	1.36	1.42	
0.52	0.56	0.69	0.83	0.93	1.04						
0.50	0.61	0.71	0.79	0.85	0.89	0.98					
0.40	0.65	0.78	0.87	0.93	0.98	1.06					

Las pruebas de esta etapa se realizaron en el canal con meandros