

01162
2ej. 4

**VELOCIDADES CRITICAS DE PARTICULAS
SOBRE FONDO RIGIDO Y PLANO
ESTUDIO EXPERIMENTAL**

HERMILO RAMIREZ LEON

TESIS

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERIA
(HIDRAULICA)**

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 1988

**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.

**VELOCIDADES CRITICAS DE PARTICULAS
SOBRE FONDO RIGIDO Y PLANO
ESTUDIO EXPERIMENTAL
RESUMEN**

El transporte de sedimentos es de interacciones extremadamente complejas razón por la cual no existe una descripción completa o analítica de este fenómeno; debido a ello se ha recurrido a el trabajo experimental y los criterios que existen para su evaluación son de carácter empírico o semiempírico. Estos criterios cada vez son más depurados como resultado del interés que existe en conocer la naturaleza de este fenómeno.

En este trabajo se presenta un estudio experimental hecho en un canal estrecho con fondo fijo sobre el cual se depositan partículas de diferentes tamaños y densidades y se estudia, para éstas, la condición crítica de movimiento. Los resultados se comparan con los criterios existentes que incluyen velocidades de fondo, velocidades medias, el esfuerzo cortante y la ley del defecto de la velocidad.

De aquí se infiere que los resultados obtenidos a partir de los datos experimentales pueden utilizarse como una primera aproximación a canales artificiales sobre los cuales se depositen partículas.

INDICE

AGRADECIMIENTOS

NOTACION

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Experimentación	4
2.1 Objetivos	4
2.2 Experimentación	5
2.3 Técnicas experimentales en la Ingeniería	
Hidráulica	6
2.3.1 Análisis dimensional	7
2.3.2 Semejanza y leyes de semejanza	11
2.3.3 Modelos hidráulicos	17
2.3.4 Clasificación de los modelos	
hidráulicos	18
2.3.5 Aplicación y limitación de los	
modelos hidráulicos	20
2.3.6 Calibración de los modelos	22
2.3.7 Efectos de escala	24
2.4 Sistemas a superficie libre	26

Capítulo 3	Instalaciones y equipo empleado	29
3.1	Canal con flujo permanente	29
3.2	Velocímetro de rayo láser	32
Capítulo 4	Materiales empleados como trazadores de corriente de fondo	41
4.1	Trazadores	41
4.2	Descripción de los materiales empleados	43
4.2.1	Arena	43
4.2.2	Baquelita	44
4.2.3	Café	45
4.2.4	Nuez	46
4.3	Estudio de laboratorio	46
4.3.1	Equipo empleado	47
4.3.2	Preparación de los materiales y selección de los diámetros empleados.	49
4.3.3	Peso volumétrico	52
4.3.4	Condiciones saturado y superficialmente seco (sss) de los materiales	54
4.3.5	Densidad	55
Capítulo 5	Inicio de movimiento con flujo permanente	64
5.1	Consideraciones teóricas	64
5.2	Ecuaciones de velocidad crítica	66
5.2.1	Criterios que incluyen la velocidad de fondo (V_b)	67

5.2.2	Criterios que incluyen la velocidad media (\bar{V})	71
5.3	Esfuerzo cortante. Conceptos de Shields	74
5.4	Estudio experimental	78
5.4.1	Ajuste de la instalación	78
5.4.2	Determinación de la zona de medición	79
5.4.3	Metodología de las pruebas	79
5.4.4	Criterio para considerar el inicio de movimiento de las partículas estudiadas	84
5.5	Flujo turbulento	94
5.6	Manejo de los datos	95
5.6.1	Diámetro seleccionado	96
5.6.2	Programa de computadora para el cálculo de las velocidades	97
5.7	comparación de los resultados con los criterios de velocidad crítica	99
5.7.1	Criterios que incluyen velocidades de fondo (V_b)	100
5.7.2	Criterios que incluyen velocidades medias (\bar{V})	107
5.7.3	Gráficas $Re-\tau_w$	118
Capítulo 6	Análisis de resultados.	128
6.1	Corrección de pared	128
6.2	Gráfica $Re-\tau_w$	131

6.3 Gráfica $R^* - r^* - D^*$ 136

6.4 Ley de defecto de velocidad 138

Capítulo 7 Conclusiones 145

REFERENCIAS

NOTACION

A	coeficiente de sedimento
A ₁ , ..., n	magnitudes físicas
C ₁ , C ₂ y C ₃	constantes
D	diámetro de partículas
D*	parámetro adimensional
d	profundidad o tirante
E _h	escala horizontal
E _v	escala vertical
F	fuerza
F _e	escala de fuerza
F _m	fuerza en el modelo
F _p	fuerza en el prototipo
f _p	frecuencia doppler
g	aceleración de la gravedad
K ₁ , K ₂	constantes empíricas
K _s	altura de rugosidad
L	longitud
L _e	escala de longitudes
L _m	longitudes en el modelo
L _p	longitud en el prototipo
M	masa
P	presión
R _b	radio hidráulico con corrección de pared

R_h	radio hidráulico
Re	escala de Reynolds
R_m	Número de Reynolds en el modelo
R_p	Número de Reynolds en el prototipo
T	periodo de onda
t	tiempo
T_e	escala de tiempo
T_m	tiempo en el modelo
T_p	tiempo en el prototipo
U	velocidad fuera de la capa límite
V_b	velocidad de fondo
$V_{b,i}$	velocidad de fondo instantánea
V_{des}	volumen desalojado por la muestra introducida
\bar{V}	velocidad media de la corriente
V_*	velocidad al cortante
V_1, \dots, m	magnitudes fundamentales
W	peso del grano
w	velocidad de caída de las partículas
y	valor parcial de d
α	pendiente del fondo del canal
β	parámetro en función de la turbulencia
δ	espesor de la capa límite
Δ	distorsión, densidad relativa
γ	peso específico
λ	amplitud de onda

ρ ángulo de reposo ó abrasión específica del material
 η fuerzas viscosas
 ν viscosidad cinemática
 θ ángulo de cruce de los rayos
 τ_c esfuerzo cortante crítico
 τ_* ó τ_{*c} parámetro de Shields
 τ_o esfuerzo cortante de fondo

CAPITULO 1. INTRODUCCION

La física de erosión y transporte de sólidos por medio de un fluido es de interacciones extremadamente complejas ya que se involucran muchas variables naturales que no siempre se comportan de la misma manera y de aquí que no exista una descripción completa o analítica de este fenómeno. El problema resulta más complejo aún, cuando el material que se erosiona es de origen cohesivo, lo cual provoca que la propiedades del fluido varíen.

Por otro lado, la mayoría de los criterios que existen para evaluar el transporte de sedimentos están basados en la experimentación, razón por la cual gran parte de las fórmulas establecidas son de carácter empírico o semiempírico. Desde luego todas estas formulaciones han partido de bases bastante firmes y los criterios son más que un mero intento por descubrir la

naturaleza del fenómeno lo más exacto posible.

Afortunadamente existe interés en conocer estos comportamientos y se descubren nuevos elementos de juicio para poder determinar, o más bien predecir, lo que puede suceder. Cada día se dan nuevos conceptos, resultados e interpretaciones, productos de muchos trabajos de investigación. Quizá algún día se pueda predecir lo que va a suceder.

El transporte de sedimentos se subdivide a su vez en varios aspectos, uno de ellos, de interés en la Hidráulica, es la determinación de las condiciones bajo las cuales las partículas depositadas en el fondo de un canal, comienzan a moverse. Condición conocida como crítica. Este problema se ha atacado de muchas formas, existiendo diversos criterios para su evaluación; de las formulaciones existentes, la mayoría de ellas están orientadas hacia el transporte de sedimentos sobre un fondo constituido por sedimentos de la misma naturaleza y pocos son concernientes al movimiento de sedimentos con fondo fijo. Este trabajo se concentra sobre un movimiento de partículas granulares depositadas en el fondo de un canal con fondo fijo, para las cuales se ha estudiado la condición crítica de movimiento.

El objetivo es el de disponer de un criterio que permita estimar, bajo estos contextos las condiciones en las cuales las partículas comienzan a moverse. Para tal efecto el trabajo puede dividirse en tres etapas: una teórica, una experimental y otra surgida a partir de la comparación de las dos anteriores. En este trabajo dichas

etapas se desarrollan en siete capítulos.

En el capítulo dos se dan algunas consideraciones acerca de la experimentación y su importancia dentro del campo de la Ingeniería Hidráulica; se abunda también sobre la formación de los números adimensionales, cuya aplicabilidad se da en los capítulos cinco y seis. En el tres se describe la instalación empleada para este estudio así como el equipo utilizado. En el cuarto se denotan algunas características de los materiales empleados como trazadores, sus ventajas y desventajas, así como un estudio hecho en un laboratorio encaminado a determinar algunas de sus propiedades de interés para este trabajo.

En el capítulo cinco se indican algunas consideraciones teóricas concernientes al inicio de movimiento con flujo permanente; se discuten las ecuaciones de velocidades críticas, tanto las medias como las de fondo, así como los conceptos de Shields y sus relaciones con el esfuerzo cortante. Se describe también el estudio experimental hecho y la discusión de la comparación de las mediciones con los criterios anteriores. En el capítulo seis se da una aplicación de los resultados obtenidos, la cual está encaminada a representar los resultados en un solo plano. Finalmente en el siete se dan las conclusiones y algunas recomendaciones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo.

CAPITULO 2 EXPERIMENTACION

2.1 Objetivos

La Hidráulica como ciencia estudia con profundidad el manejo, el control y el aprovechamiento del agua utilizando en lo más posible los fluidos reales. Muchas veces los objetivos anteriores tienen interés sólo en el campo de la ingeniería y se tienen que derivar leyes hidrodinámicamente teóricas, idealizando los fluidos. Por ejemplo, el agua es tratada como un medio continuo, más o menos homogéneo, incompresible o no viscoso e isótropo, cuyo comportamiento macroscópico es necesario entender.

Por otro lado, la complejidad de un gran número de flujos en unión con las limitaciones analíticas dan como resultado aplicaciones

limitadas y los casos resueltos son sólo situaciones esquematizadas; la dificultad se incrementa cuando se trata con flujos turbulentos.

Las técnicas experimentales surgieron como una herramienta a la búsqueda de la solución de estos problemas, ellas se han depurado a tal grado que actualmente existe una amplia gama de problemas a los cuales se les ha dado solución por esta vía.

En los subcapítulos siguientes se dan algunas técnicas que son útiles para la experimentación. Se aclara que en este capítulo "experimentación" se refiere exclusivamente a aquella que se realiza en instalaciones físicas.

2.2 La experimentación.

La experimentación puede concebirse como un arte ya que mediante ella se puede expresar de diferentes formas algún aspecto de la realidad; Para ello se requiere una especie de habilidad, de intuición, de eficacia y quizá de virtud para poder simular adecuadamente un fenómeno. Hoy en día existen muchos estándares pero, nunca un problema será igual a otro; la solución vendrá después de un análisis cuidadoso; de una profunda reflexión, de un razonamiento.

La experimentación es la base de los métodos experimentales; es en esta etapa en la cual se debe tener cuidado para poder obtener los resultados esperados.

La investigación experimental de un flujo trae consigo el estudio de sus características aunadas a las propiedades del fluido y a sus condiciones de fronteras; se basa en la construcción y operación de una instalación cuyo tamaño, forma y características son función de un objetivo determinado.

2.3 Las técnicas experimentales en la Ingeniería Hidráulica.

Cuando se quiere resolver un problema dentro del campo de la Ingeniería Hidráulica, se tiene la opción de elegir algunos de los diferentes métodos que existen; la elección de éste dependerá de las características del fenómeno y de las variables que en él intervienen. Generalmente se recurre a un modelo analítico, a un modelo físico, a una solución numérica o a una combinación de ellos. Cuando esto último ocurre se ha probado que se obtienen soluciones más acordes con la realidad del fenómeno que se estudie.

Es importante remarcar que estas técnicas por lo general requieren del auxilio de los métodos que consideran los procesos estocásticos o probabilísticos.

Otra característica importante en la selección del método es el alcance y la profundidad que se pretende darle al estudio, ya que algunos métodos llevan consigo simplificaciones que, además de restarle generalidad a la solución, pueden llegar a falsear los resultados a tal grado que no tengan relación con el

comportamiento real del fenómeno.

Por otro lado, se debe tener siempre en mente que una técnica no sustituye a la otra; sería un error suponer que una serie de resultados y reglas sencillas obtenidas con la investigación experimental supla un tratamiento racional del mismo, ya que puede ocurrir por ejemplo que dichos resultados tuvieran validez sólo en el intervalo de valores para el cual se efectuaron las mediciones y que no pueda extrapolarse fuera de esos límites. No obstante los métodos se han ido depurando mediante el adecuado entendimiento de los principios fundamentales. Como consecuencia de ello, aplicados a la Hidráulica, han surgido una serie de técnicas derivadas de la experiencia, las cuales se han agrupado según sea la naturaleza del fenómeno que se pretenda estudiar; se han desarrollado instalaciones que reciben el nombre de modelos los cuales tienen una cierta relación en cuanto a forma y comportamiento con una cierta estructura construida o que se pretenda construir. Los modelos son quizá la parte más importante de las instalaciones experimentales; mediante ellos es posible realizar también alguna mejora al diseño original durante la etapa de estudio .

En los subcapítulos siguientes se abunda en lo referente a los modelos hidráulicos así como la forma de llegar a ellos.

2.3.1 El análisis dimensional.

El análisis dimensional es una técnica matemática que utiliza las dimensiones que tienen asignadas las variables que intervienen en

un fenómeno Esta técnica es usada frecuentemente en estudios experimentales ya que proporciona una guía acerca de las variables que influyen significativamente en el fenómeno y poder determinar con ello, la dirección a la cual deba encaminarse el estudio.

Por medio de este análisis se estudia la forma correcta de obtener expresiones, números o parámetros adimensionales; es una herramienta de mucha utilidad en la experimentación y permite de una manera simple y directa la formulación de los criterios de semejanza (subcap 2.3.2). En problemas simples, conduce a los bien conocidos números característicos y leyes de modelos.

Algunas ventajas que se obtienen al trabajar con números adimensionales son las siguientes

- Permiten obtener o verificar una expresión matemática.
- Agrupa el número de variables de forma tal que se simplifica el problema.
- Al estudiar un fenómeno hidráulico en un modelo y lograr diferentes valores para los números adimensionales no se necesitan modificar todas las variables que intervienen en cada uno de ellos, ya que algunas son difíciles de modificar (por ejemplo la gravedad).
- Si un fenómeno se estudia en un modelo hidráulico las relaciones obtenidas entre los parámetros adimensionales son válidas para prototipos de diferentes tamaños o para otros modelos .

Por otra parte es recomendable que las variables que representan

a las propiedades del fluido aparezcan solas en un parámetro adimensional; además, es conveniente que todas las variables seleccionadas estén en el conjunto de parámetros adimensionales y que se trate de formar, como una primera opción números adimensionales ya conocidos, como los de Froude, Reynolds, Euler, etc; esto no quiere decir que no pueda utilizarse algún otro número particular que sólo tenga importancia para un problema.

Cada variable además de tener un valor numérico tiene una dimensión. Generalmente, las variables utilizadas en ingeniería están en función de las siguientes dimensiones básicas

M = masa; L = longitud; T = tiempo

con las cuales se identifica el sistema absoluto o científico. Y

F = fuerzas; L = longitud; T = tiempo

con que se identifica al gravitacional o técnico. La diferencia en ambos sistemas es que en el técnico el peso de un cuerpo es una fuerza que varía de un lugar a otro con la aceleración de la gravedad y por el contrario, en el absoluto la masa siempre es constante; la relación entre ambos está dada por la segunda ley de Newton, la cual en función de sus magnitudes fundamentales se escribe como

$$[F] = [M L T^{-2}]$$

Los corchetes indican que se trata de una igualdad entre dimensiones. Por otro lado existen otros fenómenos en los cuales intervienen la temperatura o variables eléctricas, además de las ya mencionadas; cuando esto sucede éstas deben incluirse de alguna forma al momento de establecer los parámetros. El sistema de dimensiones más utilizado para resolver problemas con ayuda del análisis dimensional es el $[M,L,T]$; no obstante el sistema $[F,L,T]$ es utilizado para resolver problemas con tratamiento ingenieril.

Para formar parámetros adimensionales existen diversos métodos, de entre los cuales el más conocido es el teorema de Buckingham, que está basado en el teorema del mismo nombre (también llamado de Vaschy o teorema Π) que se enuncia como sigue: Toda ecuación dimensionalmente homogénea, en la que intervienen n magnitudes físicas, A_1, A_2, \dots, A_n , que se expresan en función de m magnitudes fundamentales, V_1, V_2, \dots, V_m , puede reducirse a una relación entre $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}$ números adimensionales . A partir de éstos se puede llegar a establecer una ecuación que las relacione o a una representación gráfica mucho más condensada. El teorema Π presenta la desventaja de que algunas veces se encuentran parámetros que no tienen significado para el problema; cuando esto ocurre se debe repetir el procedimiento escogiendo nuevas variables independientes. . Otro teorema que utiliza el análisis dimensional es el de Inspección, que tiene la ventaja de formar rápidamente algunos parámetros dimensionales conocidos. Existen otros métodos que son menos empleados que los anteriores, tal es el caso del de producto de potencias y el de Rayleigh (6, 22 y 25), por citar algunos.

2.3.2 Semejanza y Leyes de Semejanza.

Para que los fenómenos en un modelo y un prototipo sean comparables no basta que sean geoméricamente iguales; sino que también los flujos, o líneas de corriente deben de ser semejantes en ambos sistemas. De acuerdo con esto, la semejanza va más allá de los aspectos superficiales de similitud geométrica, con la cual erróneamente se confunde. Se debe entender como la correspondencia entre el comportamiento del flujo estudiado en el modelo y el flujo real con o sin similitud geométrica. Para lograr ésto es importante la etapa de calibración; éste aspecto se discute en el subcap 2.3.6.

Por esto, para que un modelo represente un fenómeno o sistema debe considerar tres condiciones de similitud que son: la geométrica, la cinemática y la dinámica. todas ellas pueden deducirse a partir de la ecuación diferencial de Navier-Stockes. El establecimiento de los criterios de similitud y sus límites de validez son de suma importancia; esta consideración suele influenciar la selección de un método apropiado en la técnica de simulación.

La semejanza geométrica de un modelo se alcanza cuando todas sus longitudes L_p de prototipo muestran una relación constante a las correspondientes longitudes L_m del modelo. esta relación es llamada escala de longitudes L_e del modelo.

$$L_e = L_p / L_m$$

La semejanza cinemática requiere que los eventos dependientes del tiempo procedan siempre en el modelo de tal manera que intervalos de tiempo correspondientes en el prototipo y en el modelo muestren una relación constante (escala de tiempos). Esto es

$$t_e = t_p / t_m$$

La similitud dinámica requiere la existencia de las escalas de longitudes, tiempos, masas y fuerzas las cuales relacionan al prototipo y al modelo; la prueba de esto se obtiene simplemente escribiendo la condición de que los dos sistemas satisfagan la segunda ley de Newton; ecuación que debe de ser válida para todas los sistemas dinámicamente semejantes. Aunque ésta es una condición necesaria, al mismo tiempo no es una condición suficiente. Por ejemplo, dicha ecuación no da información respecto al efecto de la viscosidad del fluido en los dos sistemas. Las condiciones necesarias y suficientes que se requieren para lograr la similitud dinámica de dos sistemas, se obtienen escribiendo la ecuación dinámica de movimiento (ecuación de Navier-Stockes) en forma adimensional, e igualando los coeficientes numéricos de los dos sistemas. Las ecuaciones dinámicas de movimiento difieren de la de Newton en que las componentes de fuerzas individuales (fuerzas de superficie y de cuerpo) aparecen como términos separados en las ecuaciones de movimiento.

Esta semejanza implica que fuerzas correspondientes en el prototipo y en el modelo deben mostrar una relación constante

(escala de fuerzas), esto es

$$F_e = F_p / F_m$$

El requisito clave para modelos hidráulicos semejantes geoméricamente es asegurar la semejanza dinámica, la cual es alcanzada cuando todas las fuerzas actuales en el modelo son reproducidas en una relación constante a la naturaleza, esto es

$$F_e = F_{p_1} / F_{m_1} = F_{p_2} / F_{m_2} = \dots = F_{p_i} / F_{m_i}$$

Todas las leyes de semejanza de mecánica de fluidos pueden ser derivadas del requisito de esta última ecuación. Los números característicos convencionales son referidos como relaciones de los varios tipos de fuerzas que actúan en un elemento fluido.

Considérese, por ejemplo, el caso de un elemento de fluido de densidad ρ con reacción inercial y bajo la influencia de la fuerza de gravedad g , desplazándose a una velocidad media V en un canal de profundidad d . Esta d se escoge como longitud de referencia para la definición del número de Froude. La reacción inercial aquí corresponde al término V . Las fuerzas gravitacionales son dadas por \sqrt{gd} , término que representa para este caso la velocidad de propagación de una onda de gravedad en aguas someras. Relacionando las fuerzas inerciales con las gravitacionales se tiene

$$(\rho, V, L, g) \rightarrow F = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{\text{reacción inercial}}{\text{fuerzas gravitacionales}}$$

Esta relación es llamada el número característico de Froude. Este parámetro juega el papel más importante en modelos hidráulicos a superficie libre, o sea donde la gravedad domina. Valores de F grandes corresponden a una influencia insignificante de la gravedad en comparación con las relaciones inerciales, mientras que los pequeños corresponden a una influencia mayor de la gravedad.

Otro número adimensional se obtiene si se considera un elemento de fluido de densidad ρ , con una longitud L y una Velocidad V, ambas de referencia y bajo la influencia de las fuerzas viscosas; por análisis dimensional se obtiene:

$$(\rho, V, L, \eta) \quad R = \frac{\rho V L}{\eta} = \frac{\text{reacción inercial}}{\text{fuerzas viscosas}}$$

que es el número característico de Reynolds, uno de los parámetros más importantes en Hidromecánica.

De un modo similar pueden derivarse otros números característicos. En cada caso las fuerzas típicas sobre el elemento del fluido (viscosas, de gravedad, elásticas, etc.) son puestas en relación con la correspondiente reacción inercial. Así, se pueden obtener

los conocidos números de Euler, Weber, Mach y otros. Por otro lado estos números también pueden ser obtenidos formalmente de las correspondientes ecuaciones de movimiento, transfiriéndolas a una forma adimensional.

En un caso general es deseable que para lograr la semejanza dinámica, todos los números característicos, de acuerdo a las fuerzas actuantes, tengan simultáneamente los mismos valores en el modelo y en el prototipo. Sin embargo en los fenómenos hidráulicos no influyen en la misma forma las características que dan lugar a los productos adimensionales considerados y puede no importar que no se conserven iguales algunos de ellos en modelo y prototipo, despreciándose las distorsiones que esto pudiera ocasionar, en la ley de similitud correspondiente o la magnitud física más importante en el estudio que se desee hacer. Por ello la similitud raramente es perfecta debido a que comunmente es imposible satisfacer todas las condiciones requeridas para lograrla.

La tarea primaria en la determinación de la semejanza es la identificación de las fuerzas actuantes; tan pronto como éstas son definidas, las leyes se obtienen directamente de los números característicos o con la ayuda del análisis dimensional. Estas son dos de ellas

Ley de Froude. Para flujos bajo la influencia de fuerzas gravitacionales (a superficie libre) se requiere semejanza geométrica e igualdad de valores del número de Froude en modelo y prototipo; esta ley es

$$\frac{F_p}{F_m} = F_e = \frac{V_e}{\sqrt{g_e L_e}} = 1$$

para la escala de velocidades, considerando la constante de gravedad g igual tanto para el modelo como para el prototipo, implica $g_e = 1$, y por tanto

$$V_e = (g_e L_e)^{1/2} = L_e^{1/2} \quad \text{velocidades}$$

$$L_e = L_p / L_m \quad \text{longitudes}$$

$$t_e = L_e / V_e = L_e^{1/2} \quad \text{tiempos}$$

$$Q_e = V_e A_e = L_e^{3/2} \quad \text{gastos}$$

$$V_e = L_e^2 \quad \text{volúmenes}$$

$$P_e = \gamma_e L_e \quad \text{presiones}$$

Ley de Reynolds. En flujos con efectos viscosos significantes, el número R y el E_u tienen que mantenerse iguales en el modelo y en el prototipo. La ley de Reynolds se expresa

$$\frac{R_p}{R_m} = R_e = \frac{\rho_e V_e L_e}{\eta_e} = 1$$

Como generalmente se hace uso del mismo fluido ρ_e y η_e son iguales a uno; esto implica que la ley de Reynolds se reduce a que la escala de velocidades sea inversamente proporcional a la escala de longitudes, esto es

$$V_0 = L_0^{-1}$$

velocidades

Además

$$L_0 = L_p / L_m$$

longitudes

$$A_0 = L_0^2$$

áreas

$$t_0 = L_0 / V_0 = L_0^2$$

tiempos

$$Q_0 = V_0 A_0 = L_0$$

gastos

En las referencias 22 y 25 pueden verse éstas y otros tipos de leyes con mayor profundidad

2.3.3 Modelos hidráulicos

Desde la segunda mitad del siglo XV la experimentación ha logrado un crecimiento en la investigación dentro de la Hidráulica; se hizo más notorio durante los siglos XVIII y XIX. Al principio del siglo XX se desarrollaron en Alemania métodos experimentales para la solución de problemas de Ingeniería Hidráulica, que consiguieron convencer a la Ingeniería Civil de la utilidad de esta proposición.

Huber Engels y Theodor Rehbock a principios de siglo fueron los primeros en montar laboratorios de Hidráulica y debido a la influencia de ambos, el uso de modelos hidráulicos rápidamente ganó atención en Alemania. El exitoso ejemplo de esos primeros laboratorios encontró pronta atención e imitación en otros países. Los modelos se desarrollaron como una herramienta de reconocimiento para la solución de problemas de Hidráulica. Ahora

el uso de ellos para la solución de problemas de ingeniería se ha convertido en un procedimiento aceptado en muchas áreas.

Un modelo en su sentido más amplio es una representación simplificada de un sujeto, evento o estado. Dirigiéndose exclusivamente a los modelos hidráulicos podemos decir que es cualquier modelo físico que sirve para la simulación de un estado o comportamiento de flujo sobre una determinada estructura o dispositivo que tenga relación con problemas hidrodinámicos o de ingeniería Hidráulica. En general los modelos son reproducciones a pequeña escala de la naturaleza en un laboratorio; aunque en algunos casos se usa una reproducción 1:1; en otras se construyen mas grandes que el prototipo.

Existe una aplicación bastante amplia de los modelos y éstos se clasifican según alguna característica determinada, para que ellos reúnan las cualidades que permitan transferir las observaciones, resultados y conclusiones a su prototipo deben ser dinámicamente similares y para cumplir con ese requisito es necesario satisfacer en lo más posible las condiciones de similitud antes mencionadas.

2.3.4 Clasificación de los modelos hidráulicos.

En la fig 2.1 puede verse una clasificación que trata de agrupar a los modelos en forma general. Se aclara que en la mayoría de las veces el diseño de los modelos incluye más de una condición; por ejemplo pueden diseñarse modelos hidráulicos marítimos distorsionados, de fondo fijo con trazadores de corriente y

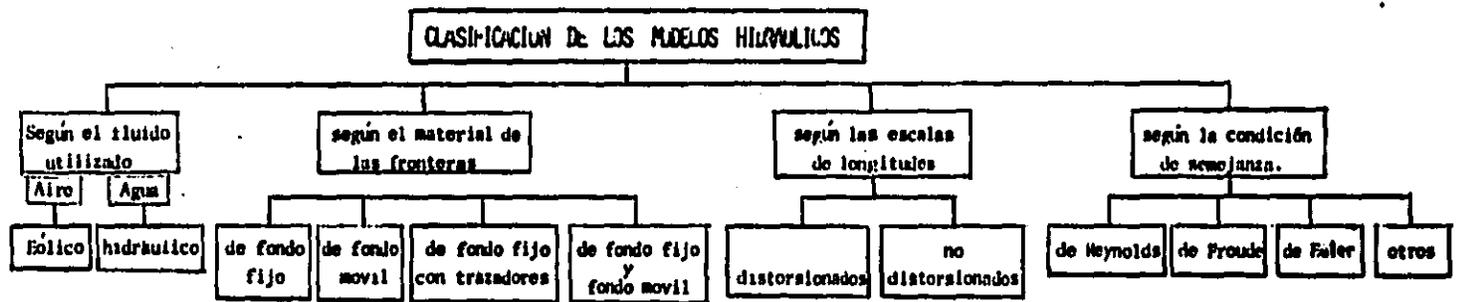


FIGURA 2.1

escalados bajo la ley de Froude.

2.3.5 Aplicación y limitación de los modelos hidráulicos

Para poder decidir si se construye o no un modelo físico se tienen que considerar una variedad de aspectos así como criterios en el proceso de decisión. Por ejemplo el grado de exactitud o solución requerida; también es de esencial importancia la simplicidad y economía. Esto se refleja sobre todo en el tiempo y en el costo y depende donde para quien y por quien se haga, ya que cuando se pueda un modelo teórico siempre será más barato y ocupará menos espacio que uno experimental.

Sin embargo, la limitación esencial para la aplicación de la experimentación es que sólo algunos procesos puedan ser simulados; por ejemplo, en el cálculo de redes de tuberías, el sistema completo puede ser calculado con un modelo numérico mientras que los coeficientes de pérdidas locales o los de descarga son determinados por la experimentación.

El diseño de cualquier estructura hidráulica puede darse de tres formas: por la teoría y el razonamiento, por la experiencia derivada de estructuras similares y por el diseño obtenido en un modelo. La Ingeniería Hidráulica utiliza los modelos para establecer soluciones óptimas, técnicas y económicas a los problemas ingenieriles sean éstos de diseño y de modificación.

Muchos problemas de flujo permanente, no permanente, movimiento

de sedimentos, dispersión, corrientes de densidad y algunos casos con geometría complicada tienen su forma más eficiente de solución en el trabajo experimental, aunque éstos sólo arrojen la forma de resolver el problema. Ingenierilmente es una ventaja que los modelos físicos reproduzcan la situación que se está modelando.

Por otro lado, la veracidad de la respuesta depende del planteamiento del problema y de la correcta identificación de los parámetros que en él influyen; por tanto el establecimiento de leyes de similitud y sus límites de validez son de suma importancia. Para ello es esencial el campo de datos de lo que se debe estudiar.

Muchos modelos hidráulicos sirven para estudiar un aspecto de un fenómeno por lo que las relaciones de escala, tamaño y características del mismo se seleccionan con ese propósito y por tanto, no se pueden estudiar simultáneamente varios fenómenos, sobre todo si en ellos intervienen fuerzas diferentes entre sí, como por ejemplo las de viscosidad y las de gravedad. Sin embargo, sí da una idea global del comportamiento general del mismo.

En cuanto a las ventajas que ofrece la simulación en modelos es que se reproducen los efectos no lineales los que frecuentemente no es posible hacer intervenir en otras técnicas; además, permite la visualización en conjunto de todos los fenómenos a lo largo de todo el espacio del modelo y en forma continua en el tiempo, en el estudio de obras hidráulicas se visualizan rápidamente todas las

modificaciones que deban hacerse a cada componente de ella, como por ejemplo, a los canales de acceso, compuertas, cambios de sección, etc.

En esto, es tal la ventaja que ofrecen los modelos y es tan bajo su costo en comparación con el total de la obra, que actualmente casi ninguna obra de relativa importancia se construye sin antes haber experimentado en un modelo.

Por otro lado, el rápido desarrollo de las computadoras aunado al de los métodos numéricos juega ya un papel importante en las técnicas de simulación; estas técnicas son preferibles en los problemas de difusión, dispersión y en transitorios tanto en canales como en tuberías.

Si se encuentra una solución que involucre a las dos técnicas de simulación anteriores, puede que sea más eficiente o más acorde con la realidad; en esto ambas técnicas podrían ajustarse y que no ocurra lo que a veces sucede: el teórico culpa al experimentador al momento de comparar los resultados. Por otro lado, no debe de hablarse de un acercamiento puramente experimental; siempre será necesario un análisis teórico, ya que los principios físicos representados por cualquier función empírica, por muy fundamentados que estén, no podrán ser generalizados o extrapolados para otros casos similares de flujo.

2.3.6 Calibración de los modelos.

La calibración consiste en el hecho de realizar una serie de modificaciones a un modelo para ajustar su comportamiento lo más fielmente posible a las características del prototipo. Esto a raíz de que cuando se opera el modelo surgen en él efectos no considerados en su diseño y construcción.

Cualquier tipo de similitud rara vez es perfecta, por ello las diferencias tanto físicas como dinámicas deben de manifestarse de alguna forma al compararlos. Algunas veces las discrepancias no se deben sólo a los efectos anteriores sino también a los efectos de las fronteras determinadas para el estudio en el modelo. Por ejemplo, el hecho de construir un modelo con fondo fijo lleva ya de por sí un efecto que quizá no sea contemplado en la predicción de su comportamiento.

Es por ello que la calibración es importante, mediante ella se detectan las diferencias anteriores y se hacen los ajustes necesarios para corregirlas; en esta etapa resulta evidente que la agudeza, la experiencia y el conocimiento profundo del problema son necesarios para hacer real y efectiva esta etapa. Cuando se trata de modelos de fondo fijo no distorsionados, y la similitud geométrica se respeta completamente, la única variable por ajustar es la rugosidad.

Generalmente se requiere que la superficie del modelo se pule perfectamente para aproximar lo más posible la rugosidad del modelo a la rugosidad teórica, la cual casi siempre es muy baja. En modelos de fondo móvil, se considera el fondo del modelo para

reproducir adecuadamente el fenómeno de interés: Por ejemplo la rugosidad del modelo se da con las partículas de fondo y las ondulaciones que aparezcan en éste. Este efecto es difícil de satisfacer, por ello suele recurrirse a la distorsión.

No obstante, siempre existiran diferencias; la interpretación de los resultados de un modelo dentro de las limitaciones del tipo de similitud que lo rija es la fase crítica de la experimentación. Por tanto debe tenerse cuidado al establecer, o mejor dicho al predecir el comportamiento que pudiera tener un prototipo. Es aquí donde entra la habilidad del experimentador.

2.3.7 Efectos de escala

Cualquier fenómeno que se presenta en la naturaleza lleva con él un número de variables, unas más importantes que otras dependiendo de cual sea su naturaleza y la forma en que se presenta. Generalmente para su comprensión racional los menos importantes se desprecian. Cuando se diseñan modelos hidráulicos físicos la simplificación de fuerzas puede tener una influencia notoria cuando se compare su comportamiento con el de un prototipo; esto es obvio ya que un modelo es un sistema que físicamente es un tanto diferente a su prototipo correspondiente.

Por ejemplo en los sistemas a superficie libre se consideran preponderantes las fuerzas de gravedad y de inercia y se desprecian las debidas a la tensión superficial y a la viscosidad; sin embargo éstas dos últimas, algunas veces, pueden tener una

marcada influencia en el modelo.

Por tanto, es necesario especificar el rango útil del modelo; a través de la práctica se ha demostrado que éstos efectos puedan disminuirse si se construyen modelos suficientemente grandes. Más aún en particular al reproducir una onda de gravedad en un modelo, si éste es pequeño, lleva el riesgo, por un lado de transformarse en una onda de capilaridad y por otra, la dificultad que se tendría en su medición; esto sobre todo si no se cuenta con el equipo adecuado de medición y que se utilicen aparatos menos sofisticados en los cuales la influencia de la formación de un menisco podría ser una desventaja más. En este tipo de sistemas es usual utilizar modelos distorsionados debido que la dimensión vertical es muy pequeña al compararse con la horizontal; esto sin duda debe de manifestarse en su comportamiento; la distorsión se define como

$$\Delta = \frac{E_h}{E_v}$$

en la que E_h se define como la escala horizontal y E_v como la vertical. Según la práctica, para evitar efectos de tensión superficial, se recomienda utilizar escalas horizontales al rededor de 50 en modelos fluviales y de 100 en los marítimos; en ambos se recomienda utilizar distorsiones no mayores de 5; cuando en el diseño resultan distorsiones mayores se recomienda utilizar otro método de solución fuera del experimental.

2.4 Sistemas a superficie libre

En el movimiento de un fluido con superficie libre pueden intervenir las fuerzas de gravedad, de viscosidad, de tensión superficial o capilares, de elasticidad y las de Coriolis, estando ligadas entre sí por su correspondiente ecuación, puede tomarse cualquiera de ellas como fundamental y a partir de ésta determinar sus expresiones adimensionales. Cuando los intereses son sólo ingenieriles suelen considerarse únicamente las fuerzas de gravedad y las de viscosidad, despreciándose las demás; por tanto se acepta que las condiciones necesarias para que existan dos sistemas dinámicamente semejantes debe haber igualdad de los números de Froude y Reynolds entre ellos. Tomando un sistema como prototipo y otro como modelo, debe cumplirse que

$$F_p = F_m \quad ; \quad F_e = 1 \quad \text{Condición de Froude} \quad (1.1b)$$

$$R_p = R_m \quad ; \quad R_e = 1 \quad \text{Condición de Reynolds} \quad (1.1b)$$

Más aún, en ciertos casos algunos de estos parámetros puede no ser de importancia y habrá necesidad, por un lado, de ignorarlo, y por otro, conviene tomar en cuenta sólo uno ya que no siempre es posible satisfacer todas las condiciones que ello implica. Prueba de esto es la solución del sistema de ecs (1.1)

$$F_e = \frac{V_e}{\sqrt{g_e L_e}} = 1 \quad \Rightarrow \quad V_e = \sqrt{g_e L_e}$$

$$Re = \frac{V_0 L_0}{\nu_0} = 1 \quad \Rightarrow \quad V_0 = \frac{\nu_0}{L_0}$$

puesto que la escala de velocidades es la misma se obtiene

$$\sqrt{g_0 L_0} = \nu_0 L_0^{-1}$$

usualmente se toma $g_0 = 1$; por tanto

$$L_0 = \nu_0^{2/3} \quad (1.2)$$

Por lo tanto, para la similitud dinámica de las fuerzas viscosas y de gravedad existe solamente un grado de libertad: la selección de un fluido en el modelo determina la escala de longitudes, por medio de la ec (1.2); inversamente si la escala de longitudes se escoge independientemente, las propiedades de los fluidos en los dos sistemas no son independientes. Si se utiliza el mismo fluido en modelo y prototipo, la escala de longitudes es igual a la unidad; es decir las dimensiones del modelo son idénticas a las del prototipo. Se dice entonces que no es posible satisfacer simultáneamente la condición de F y la de R.

Por fortuna en estos sistemas los efectos de la viscosidad son pequeños en comparación con los de gravedad y los modelos se diseñan únicamente bajo la condición de Froude. Sólo debe cuidarse que si el flujo es turbulento en uno también lo sea en el otro; esto marca un límite en el diseño del modelo. Con respecto a los

efectos de fricción éstos se transforman en un problema más de similitud geométrica que de igualdad de los números de Reynolds y pueden solventarse en la etapa de calibración.

En estos sistemas las magnitudes lineales verticales son muy importantes ya que algunos fenómenos dependen en gran parte de ellas; por ejemplo, la energía de una ola depende de su altura, la velocidad de una corriente depende del tirante de la misma, por ello es conveniente distorsionar lo menos posible el modelo y cuidar con esto la introducción de otras variables en el proceso. La precisión de los modelos y su complejidad aumenta cuando se estudian simultáneamente las interacciones entre flujo de agua y sedimentos, como sucede en ríos, estuarios y costas, aunque esto se debe en parte, a la poca exactitud de los métodos disponibles para predecir el inicio de movimiento, transporte y depósito de sedimentos.

CAPITULO 3 INSTALACIONES Y EQUIPO EMPLEADOS

Para la realización de las mediciones que se describen en el cap 5 se utilizó una instalación experimental cuya parte central la constituye el canal conocido como de Rehbock; en este capítulo se describe dicha instalación, así como el equipo necesario para la obtención de los resultados; de dichas mediciones se describe con más detalle el velocímetro de rayo láser que fue utilizado en el registro de las pruebas del cap. 5.

3.1 Canal con flujo permanente

Las dimensiones de esta instalación así como el equipo auxiliar necesario para llevar a cabo las mediciones auxiliares se indican en la fig. 3.1 y en la fotografía 3.1 (F-3.1). Las paredes del

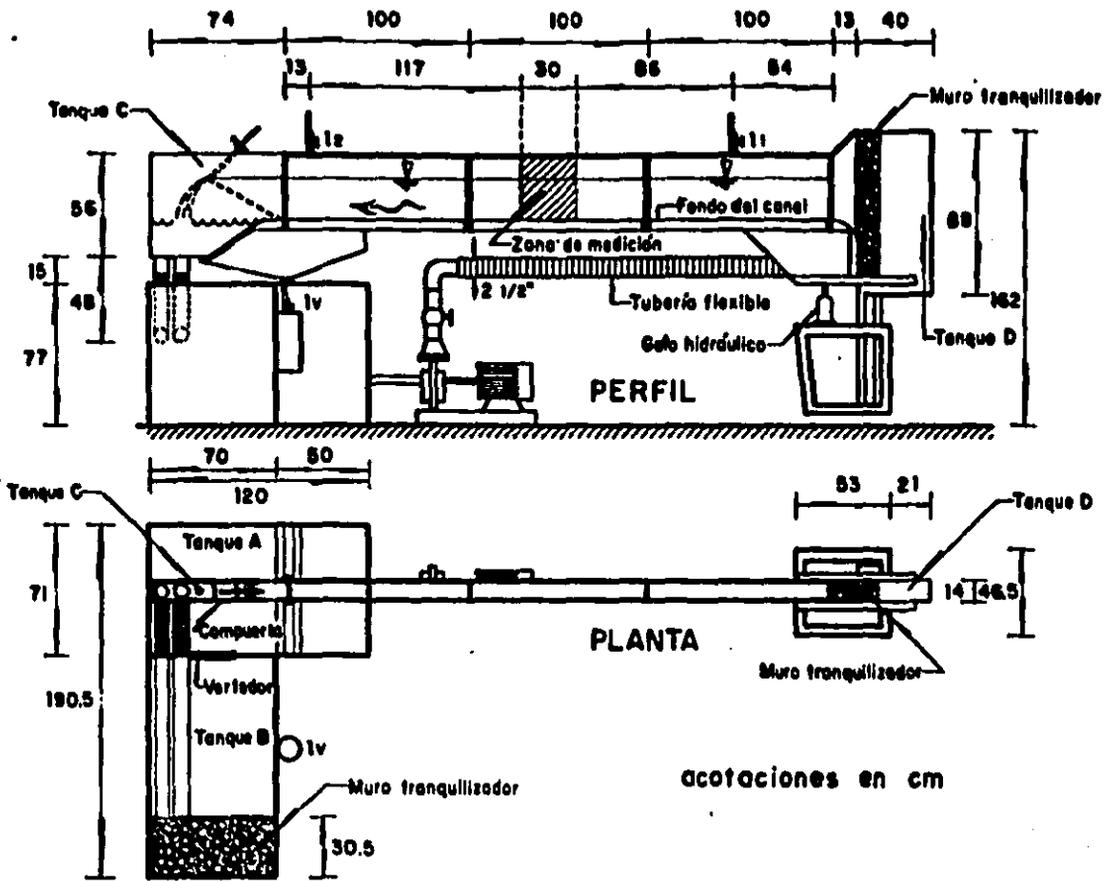


Figura 3.1 Canal de Rehbock

canal central son de vidrio y el fondo es de acero pulido.

El dispositivo cuenta con un sistema de circulación que recicla el agua por medio de una bomba que la succiona del tanque A conduciéndola por una manguera flexible de 2 1/2" de diámetro hasta llegar al tanque D, dentro del cual se tiene un muro tranquilizador, constituido por una formación de piedras cuyo diámetro promedio es de 1" y que sirve para uniformizar el flujo dentro del canal. En el otro extremo del canal existe una compuerta plana articulada en el fondo y con descarga libre en su parte superior; el flujo que es vertido sobre esta compuerta cae dentro del tanque C en cuyo fondo existen dos mangueras de 2 1/2" de diámetro que a su vez conducen el agua a un segundo muro tranquilizador ubicado en un extremo del tanque B; en su otro extremo encuentra un vertedor triangular de pared delgada, cresta afilada y con contracciones laterales, el cual, una vez que el agua ha alcanzado suficiente nivel, vierte el agua al tanque A de donde es succionado por la bomba; cerrandose así el circuito.

La variación de la pendiente del canal, cuando se requiera, se puede hacer por medio de un gato hidráulico de 1 ton. de capacidad y que está ubicado en uno de los extremos del canal (fig. 3.1). Para medir los niveles de la superficie libre del agua se instalaron dos limnímetros de punta cuyo vernier, en ambos, tiene una precisión de 0.1 mm.

Cuando fluye agua sobre el vertedor, la carga sobre éste puede ser obtenida por un limnómetro de gancho que se encuentra situado en

una de las paredes del tanque B; la precisión del vernier de este limnómetro es también de 0.1 mm.

El gasto sobre el sistema es controlado por medio de una válvula de paso de 3" ubicada a la salida de la bomba.

3.2 Velocímetro de rayo láser

Un láser es una fuente de radiación en la parte visible, infrarroja o ultravioleta, del espectro electromagnético, y su nombre es una abreviatura formada con las siglas de: "light amplification by simulated emission of radiation".

El láser ha adquirido importancia como fuente de luz en los laboratorios de enseñanza, en los de investigación y en donde pueda haber alguna aplicación práctica, debido a que sus propiedades especiales permiten mostrar las características de la luz con claridad y sencillez. También se puede realizar fácil y rápidamente prácticas y experimentos que anteriormente necesitaban de lentes, espejos, fuentes de luz colimadas y demás aditamentos que a veces oscurecían un tanto el concepto o fenómeno particular que se deseaba mostrar. Estas ventajas son debidas a la emisión inducida con la que un fotón se multiplica conservando todas sus características de fase, frecuencia, dirección y polarización; para lograr esto es necesario que la emisión inducida de fotones sea mayor que la adsorción que tiende a hacerlas desaparecer, y la teoría muestra que para ello el número de átomos en el estado superior debe ser menor que en el estado inferior. Para ello se

requiere de un mecanismo de bombeo que dé a los átomos selectivamente la energía necesaria; esto se logra en el tubo de descarga bajo condiciones específicas de presión, voltaje, composición de la mezcla de gases, etc.

Si después se coloca al medio convertido en amplificador en una cavidad (por ejemplo, entre dos espejos) resonante a la frecuencia inducida, el resultado será la aparición de una intensa oscilación electromagnética (estacionaria) de la misma frecuencia. Las características espaciales y temporales de esta oscilación estarán determinadas por la cavidad, que hará que todos los fotones sean emitidos en fase, obteniéndose luz coherente. La radiación coherente confinada en la cavidad se puede extraer haciendo que uno de sus extremos sea semitransparente a la radiación. Así pues, el láser es un oscilador óptico, una fuente de radiación constituida básicamente por un medio amplificador donde ésta se genera y una cavidad resonante que la contiene.

Escencialmente son cuatro las propiedades que caracterizan a la luz del láser y que determinan su excepcional importancia; estas son: gran intensidad, monocromaticidad, coherencia especial y directividad o colimación. Todas estas características permiten realizar con una facilidad y claridad extraordinarias, experiencias y prácticas que tradicionalmente eran difíciles de lograr. En la fig. 3.2 se muestra un esquema de un láser de He-Ne.

En este trabajo, para la medición de los perfiles de velocidades del cap 5, se utilizó un velocímetro doppler que genera un rayo

láser de He-Ne, así como unos aditamentos complementarios que son requeridos para el manejo de la información. Este velocímetro identifica las partículas que se mueven con el fluido (sean éstas del mismo o adicionales) las cuales son iluminadas al cruzar el rayo láser; las velocidades de esas partículas son identificadas por el cambio en la frecuencia debido al movimiento de las partículas cuando son registradas por un detector estacionario. De la velocidad de la partícula, es inferida la del fluido en ese punto. El equipo complementario mencionado anteriormente se indica en la fig. 3.5 y a continuación se da una breve explicación

- Fuente del láser. Se genera un rayo de He-Ne., en la forma que se indica en la fig. 3.2; el tubo de aproximadamente 2 mm. de diámetro contiene una mezcla de He-Ne a baja presión, aproximadamente 5 % de He y 15 % de Ne a 0.0033 atmósferas, que es alterada por una corriente moderada de descarga (menos de 10 mA) de corriente directa. La descarga excita a los átomos de He y dado que los estados agitados de éste coinciden con los de Ne, los átomos de este último son a su vez excitados por colisiones con los átomos del primero. Se logra así una inversión de población de los átomos de Ne que pueden entonces decaer a estados de más baja energía. En este caso las emisiones inducidas no retornan el átomo de Ne a su estado base, sino sólo a estados de más baja energía que los alterados por la interacción con los átomos de He. El átomo de Ne decae después hasta su estado base en una transición que desprende fundamentalmente calor.

Las principales frecuencias de la radiación involucradas en las

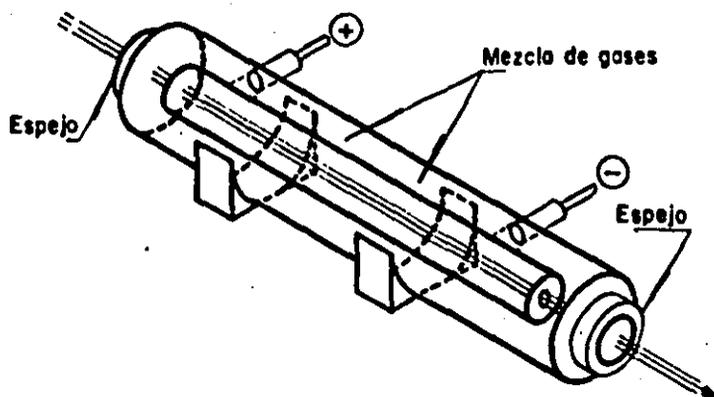


Fig 3.2 Esquema de un láser de He-Ne

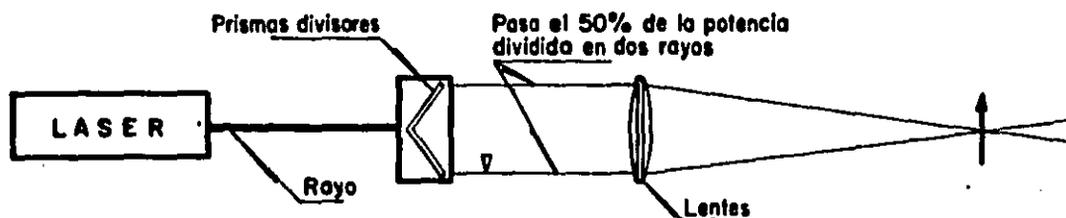


Fig 3.3 Esquema general del láser empleado

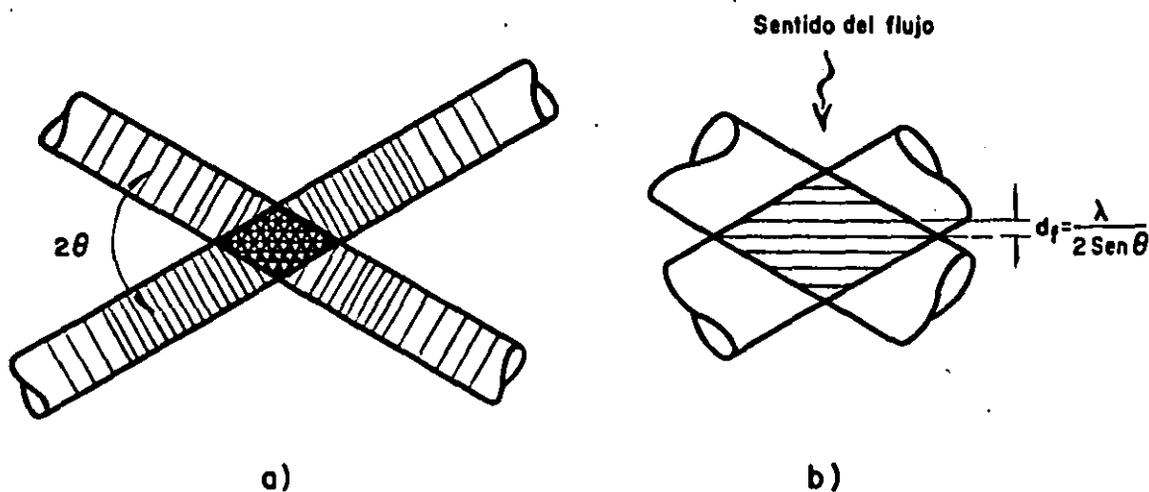


Fig 3.4 Cruce de los rayos formados por frentes de onda de máxima amplitud
 a) Las franjas oscuras o luminosas se forman por la intersección de puntos de máxima amplitud b) Distancia entre franjas

transiciones del Ne y que son útiles para la emisión inducida están en el visible (6328 Å) y en el infrarrojo (3.39 y 1.15 μm) .La elección de sólo una longitud de onda se hace ajustando la reflectividad de los espejos con recubrimientos llamados de multiplaca, de tal forma que sea máxima a la longitud de onda elegida (para el láser de He-Ne es de 6328 Å), de esta forma la cavidad tiene máxima resonancia a dicha longitud de onda.

Por otro lado, la cavidad resonante consiste generalmente en un espejo plano en la parte de atrás y uno cóncavo en el extremo por donde sale el haz, llamado arreglo de potencia; esto hace al láser tan estable que puede aguantar esfuerzos y vibraciones típicas de un laboratorio. El espejo cóncavo tiene su foco en el espejo plano por lo que el haz saldría divergente, para compensar esto, el espejo de salida tiene una superficie convexa en la parte exterior. Este espejo es un reflector parcial que refleja aproximadamente el 99 % de la luz y transmite el 1 %. El espejo de atrás tiene más reflectividad y sólo deja pasar el 0.01 %. Hay que mencionar que la eficiencia del láser es de sólo 0.1 %; es decir, la energía convertida en radiación coherente es sólo una pequeñísima parte de la energía que se da al sistema; sin embargo, las propiedades de la radiación que genera determinan su importancia en la investigación y en aplicaciones prácticas.

Una vez que este rayo ha sido generado pasa por un divisor de rayo, fig 3 .3, en el que existen dos prismas por medio de los cuales el 50 % del haz luminoso se desecha y sólo pasa el otro 50 % dividido en dos rayos. Estos rayos pasan por una lente que les

hace converger en un punto en el cual interesa hacer la medición. En nuestro caso este punto se situaba dentro del flujo, justamente en la vertical del centro de la zona de medición del canal (fig 3.1).

El cruce de los dos rayos de máxima amplitud, fig 3.4, hace que se genere una zona de franjas aún más luminosas cuya separación entre ellas es

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

en la que λ es la amplitud de la onda y θ el ángulo de cruce de los dos rayos, fig 3.4

La corriente del fluido es perpendicular a ésta zona, por tanto una partícula que la cruce dará como resultado que la velocidad del fluido sea igual a la de la partícula. Por otro lado se puede definir

$$V_p = \frac{dr}{T}$$

en la que T es el periodo de la onda; pudiéndose escribir que: $T = 1 / f_p$; en la que f_p es la frecuencia doppler característica de la radiación de luz por partícula observada, medida en Hz; por tanto

$$V_p = dr f_p$$

en nuestro caso $dr = 3.26 \mu\text{m}$; quedando como incógnita sólo f_p .

El cruce de los rayos es detectado por un receptor de la señal sobre el cual va montado el fotodetector, fig 3.5 el que tiene una eficiencia de quantum alta y un control de circuito de seguridad. Posteriormente la señal pasa por un fotomultiplicador y la frecuencia puede aumentarse hasta los 200 MHz; de aquí la señal es mandada al procesador de datos; en éste, se selecciona previamente el rango de frecuencias esperado con el fin de tener un mejor registro de la señal esperada; aquí la señal es procesada; transformada y arrojada en las unidades que nos interese, generalmente en cm/s o bien en m/s.

Aunado, a esto se utilizó un osciloscopio con el fin de tener un control óptico de la frecuencia esperada; este aparato se conectaba tanto al procesador de datos como al fotodetector, (fig 3.5).

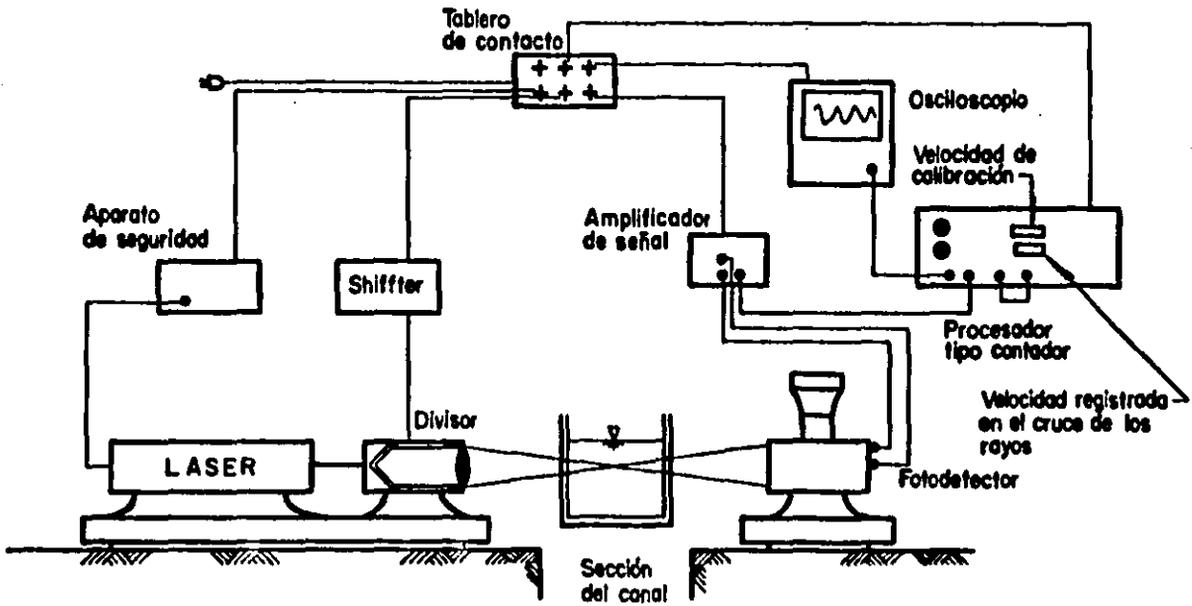
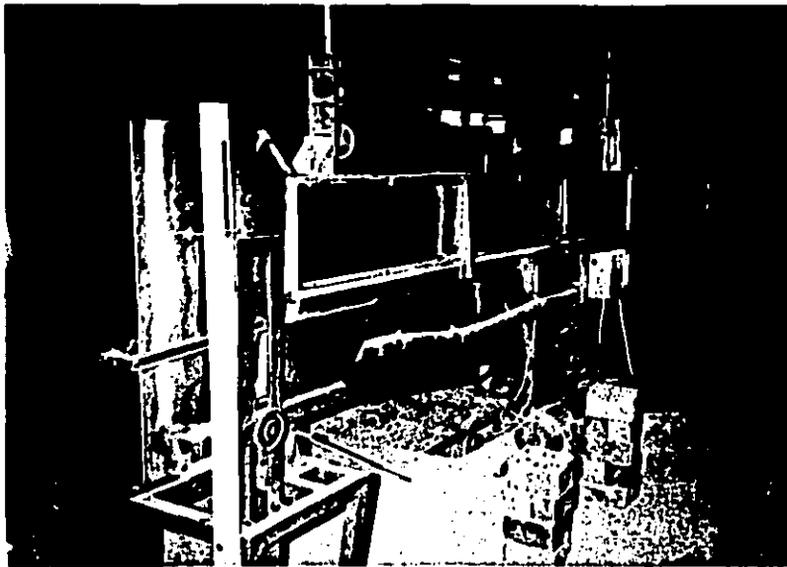


Fig 3.5 Velocímetro láser y equipo complementario



(a)



(b)

Fotografía 3.1 Vistas parciales de la instalación
empleada

CAPITULO 4 MATERIALES EMPLEADOS COMO TRAZADORES DE CORRIENTE DE FONDO

4.1 Los trazadores

Trazador es el nombre genérico que se le da a ciertos materiales o sustancias que ayudan a identificar o esclarecer el comportamiento de un fenómeno; su uso es muy frecuente dentro del campo de la Hidráulica y por lo mismo su aplicación es cada vez más eficiente.

En los sistemas a superficie libre siempre interesa conocer la forma y la cantidad en la cual las fronteras que los delimitan son modificadas como resultado de la acción dinámica del agua sobre ellas; este conocimiento es de suma importancia ya que sobre tales

sistemas se requiere de la construcción de obras de protección o de aprovechamiento.

En los sistemas marítimos pueden emplearse trazadores para identificar y cuantificar las corrientes litorales; valiéndose para ello de granos de arena de la playa en estudio, recubiertos con pintura fluorescente o bien partículas cargadas radioactivamente que pueden ser del mismo material de la playa u otros que cumplan con algunos requerimientos previamente establecidos. En las corrientes fluviales ambos trazadores se aplican para la cuantificación del transporte de la capa de fondo; se ha visto que en estos sistemas el trazador radioactivo presenta más ventajas para describir el comportamiento aleatorio de un lecho.

Cuando se realizan estudios experimentales sobre ambos tipos de sistemas los trazadores vienen a ser una parte complementaria en ellos ya que no sólo ayudan a cambiar el problema sino que también ofrecen ventajas en cuanto a la eficiencia y economía en el experimento. Los modelos de fondo fijo con trazadores en el fondo son una prueba de ello. En este trabajo se emplearon algunos materiales granulares como trazadores para identificar condiciones críticas de flujo permanente cuando éstos, previamente depositados en forma aislada en el fondo, comienzan a moverse (fig 5.5 y F-5.9 del cap 5); se utilizaron cuatro tipos de materiales con diferentes diámetros de cada uno, para un total de dieciseis. Para efectos de comparación con otros criterios de condiciones críticas de flujo fue necesario realizar un estudio de laboratorio para

determinar algunas de las propiedades mecánicas de los materiales. Este estudio se describe en los siguientes subcapítulos.

4.2 Descripción de los materiales empleados.

Los materiales empleados fueron arena, granos de café, baquelita y cáscara de nuez triturada; para lograr una descripción general de ellos tenemos que referirlos a ciertas características como lo son su constitución física, algunas de sus propiedades mecánicas y a otras consideraciones en cuanto a costo y a facilidad de obtención, para ello nos hemos auxiliado de los laboratorios de Micromecánica de suelos y de Estructuras y Materiales, ambos del II, así como de lo existente en la bibliografía. A continuación se describen cada uno de los materiales mencionados y posteriormente el estudio de laboratorio. Cabe aclarar que dichos materiales fueron utilizados por su bajo costo y la relativa facilidad para adquirirlos.

4.2.1 Arena

La arena como acumulación de granos sueltos de material mineral puede encontrarse en suelos o terrenos superficiales, en depósitos formados por corrientes naturales de agua o bien obtenerse de canteras; de aquí se desprende la alta disponibilidad y la facilidad con que puede conseguirse este material. Según la clasificación de la American Geophysical Union para materiales sedimentarios (ref.), las arenas quedan comprendidas entre 0.062 mm y 2 mm. En este caso, se ha empleado arena que se encontraba

disponible en el II, constituida por arenisca parcialmente cementada con silicatos y en la cual se observaban indicios de feldespatos. El material no es de origen aluvial sino que es extraida del banco de Sta Marta en el Estado de México.

4.2.2 Baquelita

Es una resina sintética obtenida por un proceso químico llamado polimerización, mediante el cual se unen varias moléculas idénticas para formar otra mayor; este proceso se aplica al fenol, que es un derivado oxigenado del benceno, con el formol o formaldehído y que se hacen reaccionar por medio de un catalizador. Fue inventada por Baekeland en 1900; es un producto parecido al ámbar, muy fuerte, aislante eléctrico, insoluble en cualquier solvente conocido y muy resistente a la mayoría de los agentes químicos. Resiste 300 °C o más sin fundirse, pero a temperaturas superiores se carboniza y arde.

En uno de sus estados preliminares es un líquido que solidifica por aplicación de calor. Esto último permite emplearla para impregnar bobinas de dinamos o motores, se usa también para endurecer madera y otros cuerpos porosos y es común su empleo en joyería, los joyeros que antiguamente empleaban el ámbar, lo han reemplazado casi totalmente por la baquelita transparente, que es más resistente, de mejor apariencia y más barata. En este estudio se utilizó baquelita disponible en el II.

4.2.3 Café

El café es una semilla proveniente del cafeto, que se somete a procesos de mezclado y tostado para obtener su forma comercial. Generalmente, también es sometido a un proceso de trituration que puede ser industrial o rudimentario.

En la operación de torrefacción o tostadura se forman dos componentes solubles al agua, que son los extractivos pesados y las materias aromáticas más ligeras. Los primeros comprenden la cafeína, ácido cafetánico, glucosa, dextrinas, proteínas y materiales minerales. También contiene algunos aceites grasos que, al descomponerse, determinan el grado de acidez del café. Las segundas son empleadas comunmente con fines comerciales.

Su disponibilidad en el mercado es muy amplia y su costo variable, dependiendo de la presentación que se busque, se recomienda conseguir simplemente café molido, tal como fue usado en este estudio.

En el comercio se emplean muchas denominaciones para los grados de aspereza o finura del café molido; basto, medio, fino, muy fino y pulverizado son los más importantes para los consumidores.

El café que se ha utilizado en este trabajo es el sobrante del que se consume a diario en el II, el cual se fue juntando durante varios días hasta reunir la cantidad suficiente para este estudio.

4.2.4 Cáscara de nuez

La nuez es un fruto comestible que tiene la semilla encerrada en un pericarpio coriáceo, es decir, semejante al cuero, óseo o leñoso y además indehisciente, es decir, que no abre por sí solo.

Es precisamente ese pericarpio endurecido el que interesa utilizar. Sus principales características son una textura rugosa y en pocas ocasiones casi lisa, dependiendo de la clase de nuez, y una dureza que varía considerablemente, también según la clase.

El desecho obtenido de una nuez, principalmente la cáscara, es variable, algunas proporciones son: castañas frescas 16 %, castañas secas 23 %, cacahuates 27 %, almendras 47 %, y nuez de nogal 86 %.

En este caso se ha empleado cáscara de nuez de la comúnmente llamada encarcelada o de cáscara de papel conseguida en la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, en los desechos de los comercios.

4.3 Estudio de laboratorio

Para referirnos a cada uno de los materiales, lo haremos mediante una nomenclatura sencilla que incluya tres caracteres; el primero se refiere al material, siendo A para la arena, B para la baquelita, N para la cáscara de nuez y C para el café; el segundo y tercer carácter indicarán malla o tamiz y el tamaño de ésta respectivamente. Por ejemplo, AM14 se referirá a una arena

retenida en la malla número 14.

4.3.1 Equipo empleado

A continuación se describe el equipo empleado en el laboratorio, así como sus principales características.

Mallas. Se utilizó un juego de mallas metálicas marca TYLER (F-4.1), de uso común en la operación de cribado; los tamaños de las mallas empleadas así como sus aberturas se indican en la tabla 4.1.

MALLA No.	ABERTURA
1/4"	6.35 mm
4	4.69 mm
8	2.38 mm
14	1.41 mm
16	1.19 mm
25	0.711 mm
30	0.59 mm
50	0.297 mm

Tabla 4.1. Tamaño de abertura para las mallas utilizadas

Cribadora Rotap. Este aparato (F-4.2) está diseñado para separar materiales de acuerdo a un mismo tamaño según la clasificación de mallas que se le adapte. Al ponerse en marcha esta máquina ejerce sobre las mallas un movimiento horizontal así como un golpeteo

vertical; cuenta además con un mecanismo de reloj, el cuál da la opción de seleccionar un tiempo de cribado que va de 1 a 30 min. Este aparato es de la Tyler Industrial Products, modelo B y cuenta con un motor de 1/4 HP.

Horno eléctrico. (F-4.3) Cuenta con un control de temperatura que va de 0 a 220°C; es de dos puertas y tiene dos parrillas en su interior cuya posición puede variarse. La altura total de este horno es de 1.5 m.

Balanza eléctrica. (F-4.4) Es marca SAUTER, tipo K-1200; cuenta con dos rangos de medición: uno que va de 0 a 120 gr con una precisión de 0.01 gr y otro que va de 0 a 1200 gr con una precisión de 0.1 gr.

Frasco de Chapman. Está graduado en ml y tiene una capacidad de 450 ml; tiene una forma especial (F-4.5) que facilita la obtención de la densidad de un material.

Frasco de Lechatelier. Al igual que el anterior, su graduación está en ml, y posee una capacidad de 50 ml. Este frasco tiene diferente forma, menor tamaño y volumen que el anterior, pero su funcionamiento es idéntico (F-4.6).

Probetas. En el proceso se utilizaron dos, una de 500 ml de capacidad (F-4.7) y otra de 1000 ml (F-4.8).

Vasos de precipitados. Se utilizaron dos con capacidades de 100 y

250 ml (F-4.9).

Trituradora. Es de marca SOILTEST modelo C-2, y cuenta con un motor de 3 HP de potencia (F-4.10).

4.3.2 Preparación de los materiales y selección de los diámetros empleados.

Antes de proceder al estudio de laboratorio fue necesario preparar adecuadamente las muestras de material y elegir de ellas algunos tamaños convenientes para el estudio.

La preparación del café fue la siguiente; una vez que se había juntado el material, se sometió a un proceso de lavado que constituyó la eliminación de la coloración de las partículas, empleándose para ello una malla de tela, la cual sólo permitía el paso del agua, reteniendo todo el material; posteriormente fue secado en forma natural, esparciéndola y exponiéndola a los rayos solares.

Para la selección de los tamaños, la muestra totalmente seca fue cribada por medio del Rotap y el juego de tamices antes indicado más una charola; los porcentajes retenidos en cada tamiz (F-4.11) se separaron en forma aislada en bolsas de plástico marcadas de acuerdo al número de malla.

Después, cada uno de los porcentajes retenidos se depositaron en un recipiente con agua procurando que sobre el material existiera

un tirante de agua de 1", según las especificaciones de los laboratoristas, con el fin de saturar toda la muestra. En esta etapa se detectaron partículas flotantes, las cuales fueron retiradas. Asimismo se desecharon los porcentajes de las mallas M100, M200 y lo retenido en la charola, ya que la mayor parte de esos materiales se suspendían en el agua; también se desecharon, para algunos casos, los retenidos en las mallas M4 y M8; éstos por ser porcentajes muy pequeños en comparación con el total. Se usaron para este caso las siguientes muestras, CM14, CM16, CM25 y CM30.

El mismo procedimiento fue utilizado para la arena y la baquelita; por razones análogas se seleccionaron los siguientes tamaños AM14, AM16, AM25 y AM30 para la arena; para la baquelita BM14, BM16, BM25, y BM30 .

El proceso de preparación para la cáscara de nuez fue diferente en su inicio. El material disponible fue lavado para eliminar polvo y algunas basuras que se encontraban mezcladas; después de esto se requirió hornear el material, tanto para tratar de eliminar en lo más posible la parte blanda interna y dejar únicamente la parte estéril orgánica como para quemar la parte exterior y tratar de evitar con esto que cambie de tamaño, por ejemplo, al estar inmerso en el agua. Posteriormente se sometió a un proceso de trituración para obtener dimensiones del orden de los materiales anteriores. Para ello se requirió de la trituradora. El procedimiento que utiliza ésta es el de provocar la ruptura del material a base de cargas de impacto, por ello es conveniente

mencionar que debido a las características del material, las propiedades físicas o mecánicas no se alteran, esta parte de la nuez posee ciertas características elásticas a las cuales siguen la ruptura repentina debido a la fragilidad del material; las cargas de impacto que se le proporcionan durante el proceso de trituración dependen básicamente de la fragilidad, pudiéndose decir que sus propiedades dentro del rango elástico permanecen inalteradas; este comportamiento se puede apreciar en la fig 4.1. Todo este proceso se hizo con el objeto de darle consistencia al material. Una vez hecho lo anterior se procedió en forma semejante a las otras muestras, en este caso se seleccionaron los siguientes tamaños NM14, NM16, NM25 y NM30.

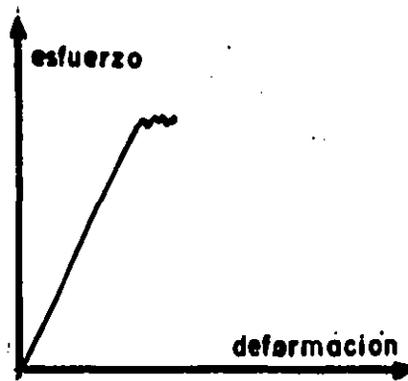


Figura 4.1 Ley de esfuerzo deformación de la nuez.

Una vez que se determinaron los tamaños por emplear, cada uno de ellos se separó en tres porciones para los siguientes fines

1. Obtener algunas propiedades físicas o mecánicas del material
2. Determinar la constitución física de los materiales

3. Para la parte experimental del capítulo 5.

La porción del primer punto se utilizó para la determinación del peso volumétrico suelto y varillado y la densidad; lo obtenido en el segundo punto ya se ha comentado en el subcap 4.2; finalmente, la porción del último punto se empleó para la parte experimental de este trabajo.

4.3.3 Peso volumétrico

Hay dos valores para esta relación, dependiendo del grado de acomodamiento que se dé al material inmediatamente antes de realizar la prueba; la denominación que se le dará a cada una de ellas será "peso volumétrico suelto" y "peso volumétrico varillado". La utilidad de uno y otro dependerá de las condiciones de manejo a las que se sujeten los materiales en el trabajo.

Para determinarlos, se realizó lo siguiente: primero, se consiguió un recipiente adecuado para la prueba, posteriormente se separó la cantidad suficiente de material a utilizar, de tal forma que no llegara a hacer falta, considerando que en su manejo hay partículas que escapan y se pierden, reduciéndose así la cantidad disponible. Después se colocaron todas las muestras en el horno durante 24 hrs a una temperatura de entre 100 y 110 °C. Se introdujeron todos los materiales seleccionados, tomando la precaución de que no se mezclaran entre ellos. Esto se hizo con el objeto de tener completamente secas a las partículas.

Como en el laboratorio no se contaba con los recipientes especiales para esta prueba se recurrió a un vaso de precipitados cuya capacidad fue obtenida mediante la relación

$$\gamma = W / V \quad (4.1)$$

utilizando agua, tomando $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ y el peso W de ella obtenido previamente de la balanza queda como incógnita única el volumen, el cual puede obtenerse transformando la ec (4.1) como $V = W / \gamma$. Por lo tanto, conocido el volumen del vaso puede mantenerse constante para todos los materiales, quedando sólo por determinarse el peso de cada uno de ellos.

Debe mencionarse que se obtuvieron los dos pesos volumétricos secos, el varillado y el suelto. Para el varillado se debía llenar el recipiente hasta aproximadamente 3/4 del volumen total con el material de prueba y dar 25 golpes repartidos alrededor de toda la superficie de dicho material con una pequeña varilla que se dejaba caer desde una misma altura de aproximadamente de 6 ó 7 cm; luego se agregó el material correspondiente hasta llenar completamente el vaso, se rasó y finalmente se pesó. Para el caso del peso volumétrico suelto, el cual se tiene cuando todos los vacíos están ocupados por aire, sólo se tenía que llenar el recipiente con el material dejándolo caer con un deslizamiento continuo desde una altura de unos 5 cm; a continuación, terminado el llenado se rasaba y se pesaba.

Finalmente, ya fue posible el cálculo de los valores de peso volumétrico seco y peso volumétrico varillado para cada material, utilizando la ec 4.1. Un resumen de las principales mediciones se indica en la tabla 4.2.

4.3.4 Condiciones saturado y superficialmente seco (sss) de los materiales

Antes de pasar a la obtención de las densidades se dará una explicación de la condición sss (saturado superficialmente seco) de los materiales. Para obtener esta condición se hace el siguiente procedimiento: se sumerge una muestra durante 24 horas en agua procurando que el nivel de esta última quede aproximadamente 1" arriba del de las partículas (F-4.11), con ello se cumple con la condición estándar de saturación de un material granular. Posteriormente, se procedió a darle al material la condición de "superficialmente seco", condición que es difícil de lograr ya que no se puede precisar exactamente cuando se ha conseguido, además de que existen diferentes formas de realizarlo. El procedimiento que recomendado para los materiales fue el siguiente. El material debe de extenderse sobre una placa de vidrio o algún otro material no absorbente y se remueve manualmente hasta considerar que las partículas han perdido su humedad superficial. En este caso es más recomendable el empleo de un ventilador (F-4.13). Este procedimiento se utilizó para el CM30, CM25, CM16, AM30, BM30, BM25, NM25 y NM30; para los tamaños restantes se utilizó el siguiente método: depositar los materiales sobre alguna superficie no absorbente, fregarlos suavemente con

MATERIAL	Wverill kg	VOLUMEN m ³	γverill kg/m ³	Wsuette kg	VOLUMEN m ³	γsuette kg/m ³
AM30	0.1444	1.12x10 ⁻⁴	1288	0.1353	1.09x10 ⁻⁴	1245
AM25	0.1452	" "	1295	0.1350	" "	1242
AM16	0.1408	" "	1256	0.1309	" "	1204
AM14	0.3308	2.63x10 ⁻⁴	1256	0.3220	2.63x10 ⁻⁴	1223
AM8	0.3174	" "	1205	0.3076	" "	1168
AM4	0.3213	" "	1220	0.3054	" "	1160
AM1/4"	0.3162	" "	1200	0.3027	" "	1150
CM50	0.0501	1.12x10 ⁻⁴	447	0.0437	1.09x10 ⁻⁴	402
CM30	0.0586	" "	523	0.0526	" "	484
CM25	0.0636	" "	567	0.0581	" "	535
BM30	0.0838	" "	748	0.0779	" "	717
BM25	0.0867	" "	773	0.0829	" "	763
BM16	0.0841	1.09x10 ⁻⁴	774	0.0799	" "	735
BM14	0.0848	" "	780	0.0805	" "	741
NM16	0.0688	" "	633	0.0641	" "	590
NM14	0.0716	" "	659	0.0674	" "	620
NM8	0.0680	" "	626	0.0627	" "	577

Tabla 4.2 Pesos volumétricos

una franela hasta considerar la misma condición anterior. Al inicio de la prueba también se puede hacer uso del ventilador.

Una vez que se tenían las condiciones sss se procedió a pesar el material con lo cual se obtenía el W_{sss} . Posterior a esto, las mismas muestras se introducían al horno a una temperatura de 100 °C, después de lo cual se retiraban y se removían hasta que las partículas se enfriaran, finalmente se llevaban a la báscula, obteniéndose así el W_s .

Por último se aplicó la ec (3.2) para obtener el grado de absorción. Los resultados del procedimiento anterior se anexan en la tabla 3.3.

4.3.5 Densidad.

El valor de la densidad o masa específica de una partícula se obtiene por relación de su masa entre su volumen; en este caso, sería la relación del peso de la muestra (esto es, varias partículas) entre el volumen que ocupa este mismo conjunto de partículas. Las dimensiones de la densidad en los sistemas absoluto y gravitacional son $[ML^{-3}]$ y $[FT^2L^{-4}]$, respectivamente.

Para calcularla a partir de un método de laboratorio, se requirió como primer paso conseguir las condiciones sss para los materiales a probar, utilizando los mismos procedimientos descritos atrás y obtenido para cada porción el correspondiente valor del W_{sss} .

Una vez hecho lo anterior, se utilizó el frasco de Lechatelier (o el de Chapman), el cual se llenaba con agua hasta la marca cero; posteriormente, después de secar el interior del cuello del frasco, se vertían alrededor de 50 g de material, previamente pesado y en condiciones sss dentro del mismo. Para nuestras pruebas, se tomaba este en forma inclinada y se agitaba mediante giros para expulsar el aire contenido aún dentro del frasco y que fue arrastrado por el material, luego se colocaba en posición vertical y se tomaba la lectura alcanzada por el menisco inferior dentro del cuello; esta lectura representaba el volumen desalojado por la muestra introducida (V_{des}). Finalmente, aplicando la relación

$$\rho = \frac{W_{sss}}{V_{des}} \quad (3.3)$$

se obtenía el valor de la densidad.

Los valores de densidad que se obtuvieron, se indican en la tabla 4.3

MATERIAL	D E N S I D A D		
	Wmat. sec g	Vdes. g	Densidad kg m ³ /m ³
AM14	45.0	19.0	241.6
AM16	45.0	18.7	245.7
AM25	"	18.6	246.7
BM14	35.0	24.0	148.8
BM16	35.0	24.0	"
BM25	30.0	20.8	146.8
BM30	30.0	20.9	"
AM30	45.0	18.8	243.3
CM14	25.0	22.4	113.9
NM14	30.0	22.8	134.6
NM16	31.0	23.6	133.5
NM25	30.0	22.8	134.5
NM30	"	23.5	130.5
CM16	26.0	"	113.2
CM25	25.0	22.7	112.1
CM30	"	23.0	111.1

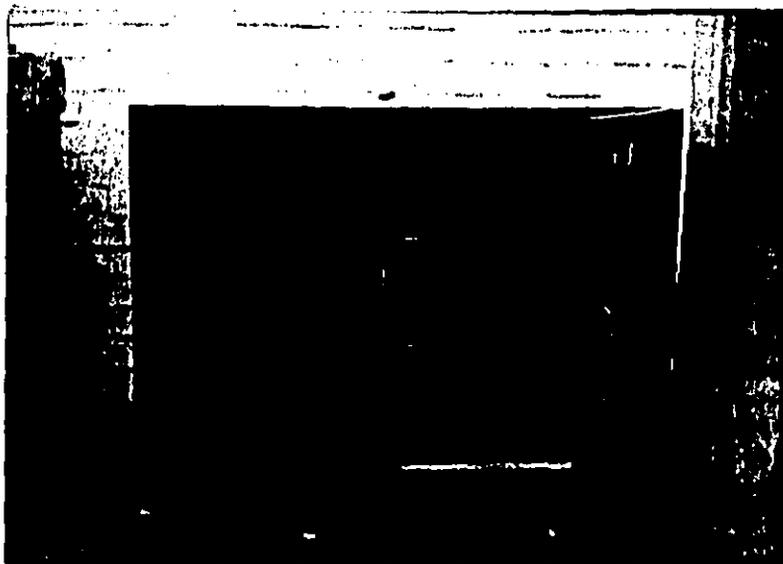
Tabla 4.3 Resultados obtenidos
para la densidad



Fotografia 4.1 Mallas o tamices



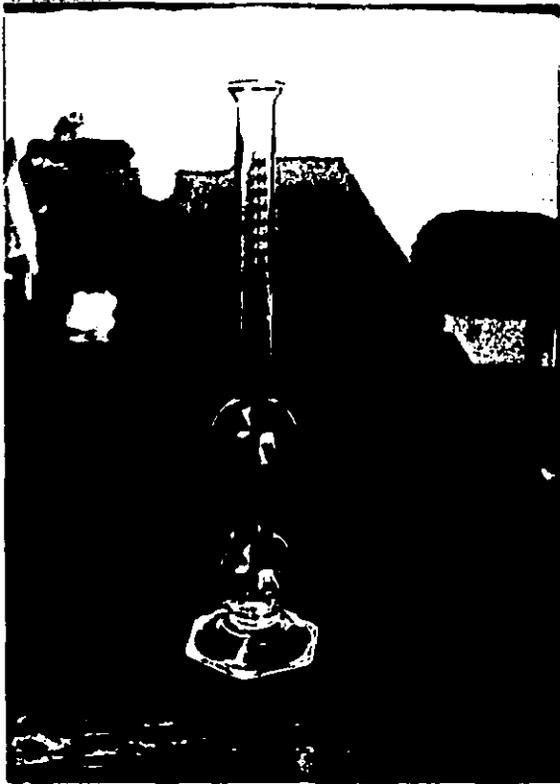
Fotografia 4.2 Cribadora



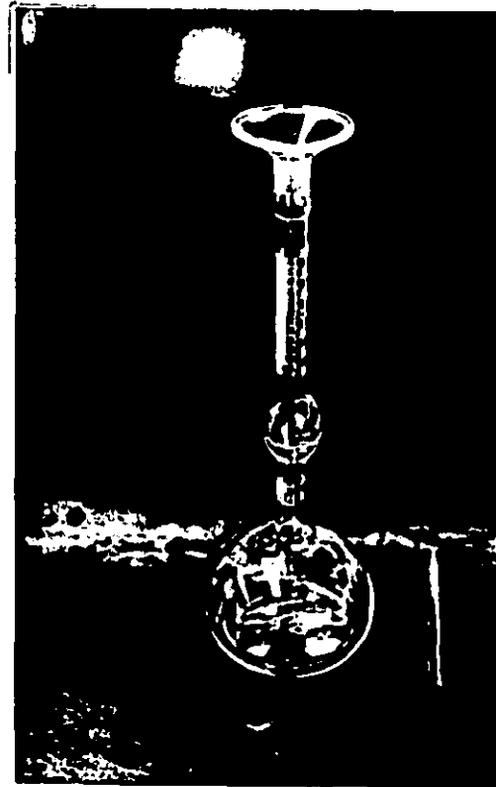
Fotografía 4.3 Horno eléctrico (de 15 a 120°C)



Fotografía 4.4 Balanza eléctrica.



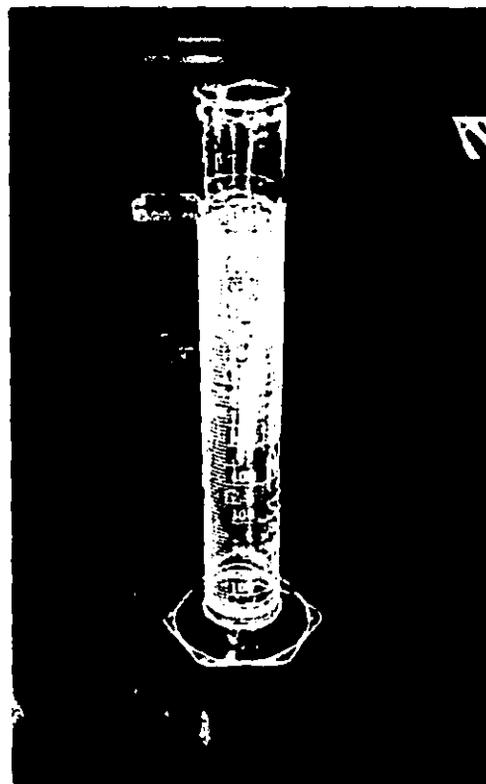
Fotografia 4.5 Frasco de Chapman



Fotografia 4.6 Frasco de Lehat



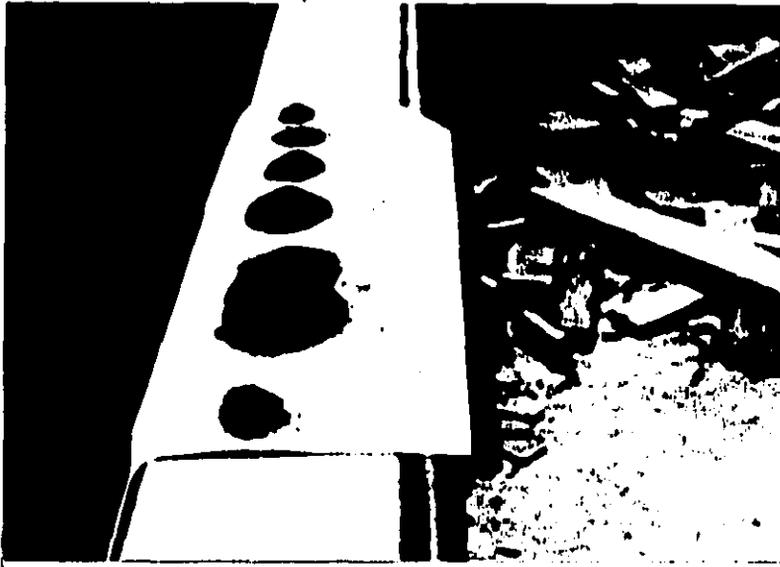
Fotografía 4.7 Probeta de 500 ml
de capacidad.



Fotografía 4.8 Probeta de 100
de capacidad.



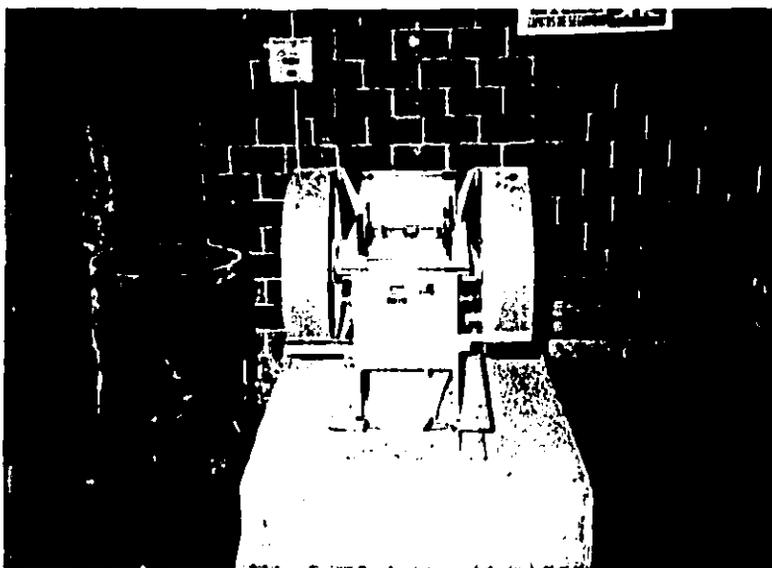
Fotografía 4.9 Vasos de precipitado de 100 y 250 ml



Fotografía 4.10 Cantidades obtenidas del cribado, clasificadas por mallas.



Fotografía 4.11 Saturación de las muestras.



Fotografía 4.12 Trituradora.

CAPITULO 5 INICIO DE MOVIMIENTO CON FLUJO PERMANENTE

5.1 Consideraciones teóricas

Quando un líquido fluye en un canal ejerce fuerzas hidrodinámicas sobre las partículas que se encuentran en su perímetro mojado. Un incremento o decremento en la intensidad del flujo se ve reflejado directamente en la magnitud de esas fuerzas las cuales, algunas veces, llegan a romper el equilibrio estático de las partículas y éstas son puestas en movimiento. Este equilibrio se altera cuando los efectos resultantes de las fuerzas de arrastre, de sustentación y de viscosidad, aplicadas sobre la superficie de la partícula resultan mayores que las fuerzas estabilizadoras (de gravedad y de cohesión). Esta condición no es la misma para todas

las partículas aun cuando éstas sean del mismo tamaño; la razón es que se encuentran expuestas a la variación del arrastre medio temporal, τ_0 , a lo largo del perímetro mojado, a la intensidad de la turbulencia sobre ellas, a los distintos grados de cohesión a que están sujetas y a que el área de cada partícula expuesta a las fuerzas perturbadoras varía de una a otra.

En este trabajo interesa el estudio del inicio de movimiento de partículas depositadas directamente en el fondo de un canal con fondo plano y rígido, por ello de aquí en adelante se hará referencia sólo a esta condición.

Existen muchos aspectos que suelen tomarse en cuenta para la determinación del inicio de movimiento de partículas como son, la forma y densidad de las partículas, la forma de la sección transversal y la pendiente longitudinal del fondo del canal, la graduación del material, el flujo secundario, etc. No obstante, un factor que influye de manera determinante es el hecho de cuando y como considerar el inicio de movimiento, si cuando una sola partícula se mueve o cuando un número de ellas lo hacen. Esta es una de las razones por las que existe imprecisión en la determinación del inicio de movimiento. Algunos autores agrupan esta condición en tres clases: débil, cuando sólo algunas partículas se ponen en movimiento; medio, cuando las del diámetro representativo comienzan a moverse pero el fondo sigue plano; y general cuando todo el fondo se mueve. Otro criterio es el siguiente: un punto inferior de inicio que se define cuando la corriente mueve las partículas más finas; un punto superior cuando

las corriente mueve las partículas más gruesas; y un punto intermedio cuando se observa un promedio de los otros dos. Debido a esto, los investigadores han formulado una diversidad de criterios; es obvio que se requiere también de un aspecto estadístico y que se tengan formulaciones de carácter empírico o semiempírico para el estudio de esta condición.

Por otro lado, independientemente de la forma en que se evalúe la condición de inicio de movimiento puede ser estudiada por medio de tres criterios que son 1. Velocidades críticas, que consideran el impacto del líquido sobre las partículas. 2. El esfuerzo cortante, que toma en cuenta el arrastre friccional sobre las mismas y 3. El criterio de las fuerzas de sustentación, que considera las diferencias de presión debidas al gradiente de velocidad. Para este último criterio las fuerzas de impulso sobre los granos y su relación a correlaciones de presión-velocidad no ha sido estudiada con suficiente detalle (10 y 25)

En este capítulo se abundará sobre el criterio de las velocidades críticas y algunas formas que existen para evaluarlas, así como lo concerniente al esfuerzo cortante.

5.2 Ecuaciones de velocidad crítica

El material que forma las fronteras de un cauce esta compuesto de partículas de diferentes tamaños y cuando los intersticios de uno mayor son llenados por otros más pequeños la masa que resulta es más densa y por tanto menos sujeta a la acción erosiva del agua;

la velocidad requerida para alterar un fondo bien conformado será mucho mayor que la requerida para mantener el movimiento de partículas del mismo material antes de que se sedimenten en el fondo o que ya hayan sido alteradas por otras velocidades. En este caso se estudia la condición de movimiento incipiente para un conjunto de partículas aisladas entre sí, sueltas y sólidas, depositadas sobre un fondo fijo, plano y horizontal; por tanto el balance de fuerzas debe incluir a la de arrastre, la de sustentación y el peso sumergido del grano.

A continuación se discuten dos tipos de criterios, unos que toman en cuenta la velocidad del fondo y otros que toman la velocidad media de la corriente. Una observación importante es que la mayoría de esos criterios fueron obtenidos tomando como base fondos arenosos o aluviales.

5.2.1 Criterios que incluyen la velocidad del fondo (V_b)

Existen diversos criterios que incluyen este término. Debido a su cercanía con las partículas se le considera en el balance de fuerzas de los granos; a pesar de ello, su empleo es limitado ya que, por un lado, resulta difícil su obtención y por otro, a que no está bien definido a que distancia a partir del fondo se le debe de considerar, esto es debido principalmente a que en la naturaleza el fondo nunca es bien conformado.

Uno de los criterios más antiguos que se tienen es el dado por la siguiente expresión [10]

$$V_b = (4 \text{ ó } 5) \sqrt{D} \quad (\text{m/s}) \quad (5.1)$$

en la cual D es el diámetro de las partículas y en m.

Otro criterio que surgió después de un análisis bastante exhaustivo es el dado por la ecuación [10]

$$\frac{V_b^2}{(\rho_s/\rho - 1)gD} = A \quad (\text{m/s}) \quad (5.2)$$

en la que g es la aceleración de la gravedad y A es un coeficiente de sedimento que está en función del tamaño, forma, uniformidad, textura, etc, de las partículas, además de la dinámica del flujo, la pendiente del canal y el ángulo de reposo del material. Fue establecida para un sólido idealizado; en pruebas experimentales los diversos factores que incluye el término A bajo una u otra condición pueden desaparecer, resultar constantes o más aun, difíciles de incluir.

En una diversidad de fórmulas es común encontrar el parámetro Δ el que es definido como una relación entre las densidades de los sedimentos (ρ_s) y del agua (ρ), por medio de la siguiente relación

$$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho \quad (5.3)$$

Brahms, en 1753, dio la siguiente ecuación

$$V_b = K_1 W^{1/3} \quad (5.4)$$

en la que K_1 es una constante empírica y W el peso de un grano.

Sternberg [10], por su parte propuso la expresión

$$V_b = \zeta \sqrt{D} \quad (5.5)$$

en la que $\zeta = 4$ en promedio; en algunos de sus experimentos utilizó la velocidad media como criterio de movimiento incipiente.

En un estudio hecho por Mayis et al en 1937 y en 1943 llegaron a

$$V_b = \frac{1}{2} D^{4/3} \Delta^{1/2} \quad (\text{fps}) \quad (5.6a)$$

la cual al transformarla en unidades métricas da

$$V_b = 0.9674 D^{4/3} \Delta^{1/2} \quad (\text{m/s}) \quad (5.6b)$$

Cartens, en 1966 reportó que de los datos publicados sobre el movimiento incipiente puede llegarse a

$$\frac{V_b^2}{\Delta \rho D} = 3.61 (\tan \varphi \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (5.7)$$

en la que φ es el ángulo de reposo o abrasión específica del

material y α es la pendiente del fondo del canal.

Las siguientes expresiones son debidas a Maza Alvarez, que propone

$$V_b = 1.92 \Delta D^{0.45} \quad (5.8)$$

válida para cuando $D > 2.0$ mm, y

$$V_b = 1.41 \Delta D^{0.20} \quad (5.9)$$

para cuando $0.2 < D < 2.0$ mm

En las fórmulas anteriores se ha considerado una velocidad promedio; se ha establecido que debido a la turbulencia del flujo en la zona cercana al fondo puede alcanzarse una velocidad instantánea de

$$V_{b,i} = 1.75 V_b$$

en la que $V_{b,i}$ es la velocidad instantánea y V_b es la que se ha considerado en las formulaciones anteriores.

Una consecuencia directa de esta última observación se obtiene al evaluar el esfuerzo cortante, ya que éste varía con el cuadrado de la velocidad, por tanto

$$\tau_{c,i} = 3 \tau_c \quad (5.11)$$

5.2.2. Criterios que incluyen la velocidad media (\bar{V})

De las expresiones más antiguas que existen se encuentran las que se relacionan con el peso de la partícula; por ejemplo

$$\bar{V} = W^{1/6} \quad (5.12)$$

en la W es el peso de una partícula en kg.

Brakins [10], utilizando los mismos fundamentos estableció

$$\bar{V} = K_2 W^{1/6} \quad (5.13)$$

en la que K_2 es una constante empírica y W es el peso de una partícula.

Levi [3], estableció la siguiente relación empírica

$$\bar{V} = 1.4 \sqrt{gd} \left[1 + \text{Ln} \sqrt{d/7D} \right] \quad (5.14)$$

la cual es válida para $10 < d/D < 60$, con d como la profundidad del flujo y D el diámetro de la partícula.

Para la relación $d/D > 60$, propone la siguiente expresión

$$\bar{V} = 1.4 \sqrt{gD} \ln \left[\frac{d}{7D} \right] \quad (5.15)$$

En 1935 Isbach, despreció la influencia de d/D dando la relación empírica

$$\bar{V} = 1.7 \sqrt{\Delta g D} \quad (5.16)$$

Goncharov [3], propuso un criterio dado por

$$\bar{V} = 1.07 \sqrt{\Delta g D} \log (8.8d/D) \quad (5.17)$$

La siguiente relación [3], fue deducida tomando $\tau_* = 0.03$ y $K_s = 2D$

$$\bar{V} = \sqrt{\Delta g D} \log (6d/D) \quad (5.18)$$

en la que τ_* es el parámetro de Shields (subcap 5.3) y K_s es la altura de rugosidad.

Neill, en 1967 presentó una curva a partir de unos estudios hechos con material cuarzoso y uniforme, estableciendo

$$\frac{\bar{V}^2}{\Delta g D} = 2.50 \left[\frac{D}{d} \right]^{-0.2} \quad (\text{cm/s}) \quad (5.19)$$

Yang, en 1973 utilizó los conceptos de arrastre y sustentación combinadas con la distribución logarítmica de velocidad llegando a la siguiente expresión

$$\frac{V}{w} = \frac{2.5}{\log R_* - 0.06} + 0.66 \quad (5.20)$$

que es válida cuando $0 < R_* < 70$; R_* es llamado Número de Reynolds asociado al cortante y se define como

$$R_* = V_* D/\nu \quad (5.21)$$

en la que V_* es la velocidad al cortante (subcap 5.3) y ν la viscosidad cinemática; w es la velocidad terminal de caída de una partícula. Según Yang esta fórmula da buenos resultados para cuando $R_* > 1.5$ ó 2. Para cuando $R_* > 70$ se tiene una relación constante dada por

$$\frac{\bar{V}}{w} = 2.05 \quad (5.22)$$

Las constantes fueron establecidas del ajuste hecho a unas curvas empíricas.

Maynond en 1978, propuso una relación empírica tomando $\Delta = 1.65$, obteniendo

$$\bar{V} = 1.28 \sqrt{\Delta p D} (d/D)^{1/6} \quad (5.23)$$

Por su parte Maza-García de sus estudios establecieron

$$\bar{V} = 5.75 \sqrt{\tau_c / \rho} \log(12.27 Rh / Ke) \quad (5.24)$$

en la que τ_c es el esfuerzo cortante crítico (subcap 5.3) y Rh es el radio hidráulico, ellos mismos propusieron otra relación equivalente dada por

$$\bar{V} = 4.71 \Delta^{1/2} \rho^{0.25} Rh^{0.15} \quad (5.25)$$

5.3 El esfuerzo cortante. Los conceptos de Shields

Los desarrollos modernos en Mecánica de Fluidos sugieren expresar condiciones de flujo turbulento con un parámetro V_* llamado velocidad de fricción o velocidad cortante que representa una medida de la intensidad de las fluctuaciones turbulentas; se utiliza comunmente en las ecuaciones de resistencia al flujo para definir la distribución de velocidades.

Admitiendo que los promedios de las fluctuaciones de la velocidad media sean aproximadamente iguales a V_* puede llegarse a

$$V_* = \sqrt{\tau_o / \rho} \quad (5.26)$$

en la que τ_o es el esfuerzo cortante de fondo que produce la corriente. Si se sustituye el valor del esfuerzo cortante dado

por

$$\tau_0 = \gamma R h S \quad (5.27)$$

se obtiene

$$V_* = \sqrt{g R h S} \quad (5.28)$$

Una relación que permite determinar la velocidad cortante, en condiciones críticas es dada por la ecuación [25]

$$V_* = \sqrt{\frac{2 \tan \alpha}{3 \beta}} \sqrt{\Delta g D} \quad (5.29a)$$

en la que β es un parámetro en función de la turbulencia, del arrastre por unidad de área que es tomada por un grano debido a su posición relativa, de la altura a la cual actúa la fuerza de arrastre, y a la proporción del área proyectada de los granos; α es un ángulo que se define según la ubicación de la partícula en estudio con respecto a las otras. Se ha establecido que el valor de la primer raíz es aproximado a 0.2, teniéndose

$$V_* = \frac{1}{5} \sqrt{\Delta g D} \quad (5.29b)$$

El primer investigador en utilizar este concepto fue Shields en 1936, para el caso especial de granos uniformes formando un fondo plano. El expuso que si el fondo está cubierto con una capa nivelada, la teoría de flujo turbulento (tal como fue desarrollada

por Nikuradse, Prandtl y Von Karman) debería de ser aplicable a dicha capa. De acuerdo con esto, propuso la relación adimensional

$$\tau_{*c} = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gD} = \frac{\tau_c}{\Delta\rho gD} \quad (5.30)$$

en la que τ_{*c} es la fuerza tractiva crítica requerida para producir el movimiento de la partícula. Este parámetro también puede expresarse en términos de la velocidad asociada al cortante como

$$\tau_{*c} = \frac{V_{*c}^2}{\Delta\rho D} \quad (5.30b)$$

Shields concluyó que el parámetro τ_{*c} es una función directa de otra relación adimensional definida por

$$R_* = \frac{V_* D}{\nu} \quad (5.31)$$

que es similar a la ec 5.21 que se había dado anteriormente

A partir de los conceptos introducidos por Shields se han desarrollado otros criterios análogos e inclusive sus ideas se han complementado; los resultados se presentan en las figs 5.1 y 5.2.

En el capítulo 6 se presenta una discusión basada en los conceptos de esfuerzo cortante para condiciones críticas

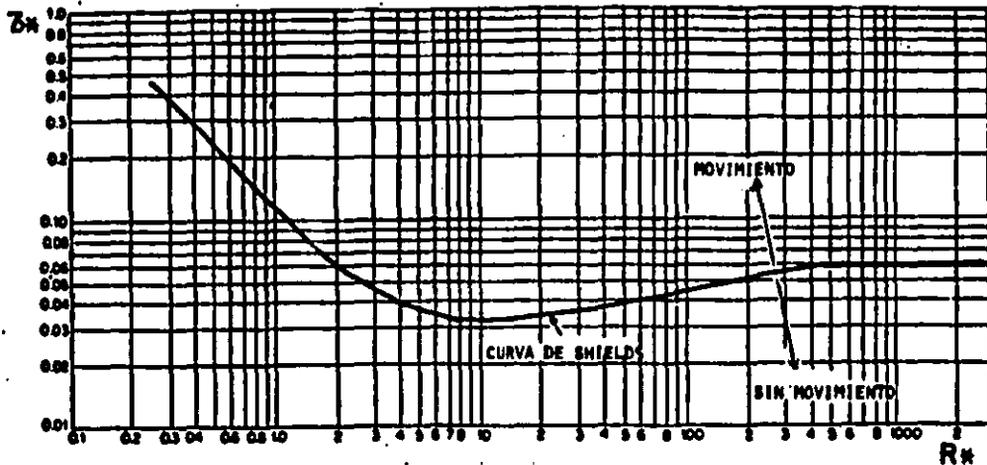


FIGURA 5.1 DIAGRAMA DE SHIELDS.

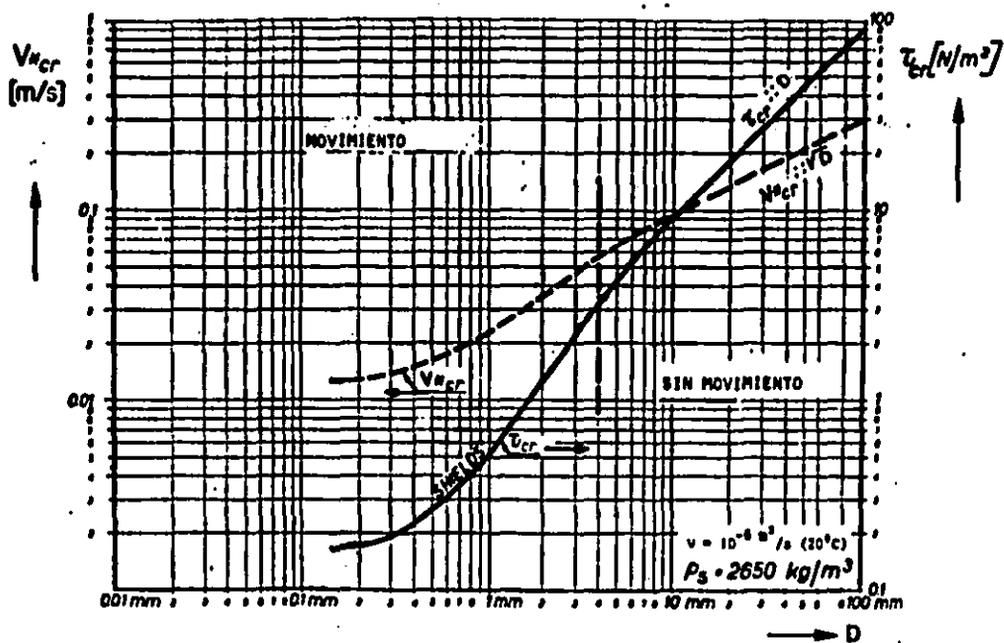


FIGURA 5.2 CURVAS DERIVADAS DE LA LEY SHIELDS.

5.4 Estudio experimental.

Antes de proceder a la explicación del estudio experimental se remarca una vez más que los criterios anteriores sirven para predecir el estado de movimiento inicial de partículas en un fondo plano pero descansando sobre otras partículas. El estudio que aquí se hace es sobre la condición de movimiento inicial de partículas aisladas colocadas en un fondo plano y rígido. El objetivo de este estudio es el de disponer de un criterio que permita escalar las partículas en modelos de fondo fijo con trazadores en el fondo.

Para llevar a cabo este estudio se utilizó la instalación que se describe en el subcap 3.1 (fig 3.1 y F-3.1); el procedimiento utilizado se indica continuación.

5.4.1 Ajuste de la instalación.

1. Se procedió a la limpieza, tanto de las paredes, como del fondo del canal, con una franela y agua; eliminándose también algunos residuos de silicón que se tenían, con una espátula.
2. Se ubicó el muro tranquilizador a la entrada del canal, formado con dos mallas de alambre con grava en su interior. El objetivo del muro fue el de disminuir la agitación que producía el agua al momento de salir de la manguera de alimentación y pasar al canal (tanque D, fig 3.1)
3. La pendiente longitudinal del canal se igualó con la horizontal

($S_0 = 0$), por medio del gato hidráulico que se encuentra a la entrada del canal; de igual forma, la pendiente transversal se ajustó también con la horizontal, pero ésta, por medio del tornillo que se encuentra ubicado a un costado del tanque D.

4. Por último se instalaron dos limnímetros de punta sobre el canal con el objeto de poder determinar la pendiente de la superficie libre del agua, en el momento de realizar las pruebas. Un tercer limnómetro, pero de gancho, se colocó en el tanque B, con objeto de conocer la elevación de la superficie libre del agua sobre la cresta del vertedor.

5.4.2 Determinación de la zona de medición

El flujo dentro del canal estaba sujeto a dos zonas de interferencia; una al cruzar el muro tranquilizador del tanque D en el cual la turbulencia no se reducía por completo y la otra a la salida del canal, ya que el flujo se hacía pasar sobre la cresta de la compuerta plana, alterándose con ello las líneas de corriente (fig 5.3). Por medio de colorantes que se inyectaban al flujo, en la entrada del canal, se pudo determinar una zona en la que el perfil de velocidades resultaba más o menos bien definido (fig 5.3). La ubicación precisa de dicha zona se indica en la fig 3.1.

5.4.3 Metodología de las pruebas

1. Antes de realizar cada serie de pruebas, se hacían necesarios

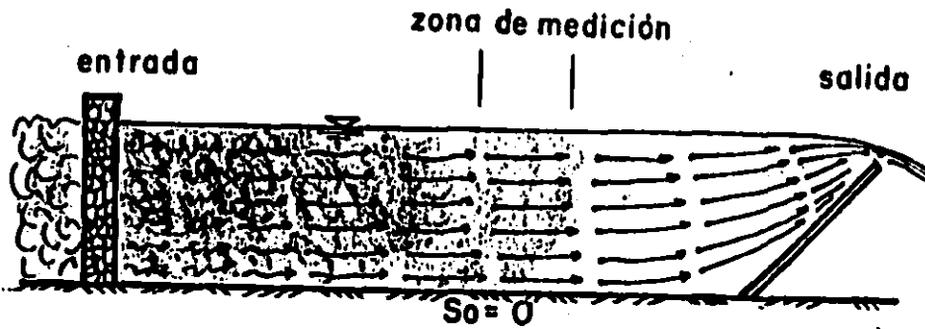


Figura 5.3 Zonas de interferencia del flujo

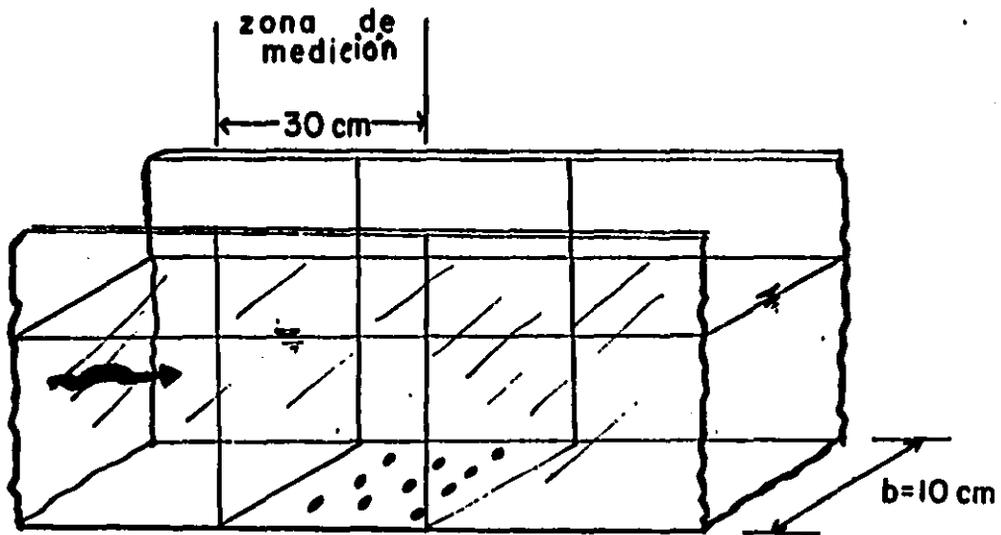


Figura 5.4 Posición inicial de las partículas

los siguientes pasos:

- a) la revisión de las taras de los tres limnómetros (F-3.1).
- b) Por medio de una manguera se llenaban los tanques A y B hasta el nivel de la cresta del vertedor que los comunica.
- c) El montaje del velocímetro de rayo láser y el equipo complementario (F-5.1 y F-5.2), así como la revisión de su calibración. Se cuidaba que el tubo generador del rayo láser estuviera alineado horizontalmente (F-5.3) y que además el cruce de los rayos quedará justamente en el centro de la sección de medición (F-5.4 y F-5.5).

Una vez hecho lo anterior, se efectuaba lo siguiente

2. Se arrancaba el motor y se controlaba el gasto por medio de la válvula. Antes de proceder a la siguiente operación resultaba necesario esperar a que el flujo se estableciera en la instalación
3. Por medio de la compuerta plana se elevaba el nivel del agua en el canal hasta uno suficiente en el que se asegurase que al momento de depositar las partículas en el fondo del canal éstas no fueran arrastradas por el flujo.
4. Se depositaban las partículas en la zona de medición cuidando que entre ellas hubiera el suficiente espacio para asegurar que no se influenciaran entre sí, fig 5.4 y F-5.6.

5. Se procedía a bajar lentamente la compuerta de fondo disminuyéndose con ello la sección hidráulica en el canal (aumentando la velocidad del flujo), hasta una elevación tal que las partículas comenzaran a moverse. El criterio tomado para el inicio de movimiento se discute en el subcap 5.4.4

6. Bajo estas condiciones hidráulicas se determinaba el perfil de velocidades, justo en la vertical de la parte central de la zona de medición. Para ello se siguió el siguiente procedimiento

- a) Se ubicaba el cruce de los rayos lo más cerca posible del fondo. la primera medición se efectuaba normalmente a 0.3 cm
- b) Se revisaba la señal que registraba el osciloscopio (F-5.7) y si esta era la misma que la obtenida en la calibración se continuaba con las mediciones de la velocidad para otros puntos; en caso contrario se ajustaba la señal mediante el fotodetector.
- c) De las lecturas de velocidad obtenidas del procesador se tomaba la máxima y la mínima que registraban en un periodo de tiempo de 1 min (F-5.8). Estas anotaciones aparecen en la hoja de registro de la fig 5.5.
- d) Posteriormente el cruce de los rayos se elevaba de tres en tres mm, hasta una altura de aproximadamente 1 cm; después de la cual, las mediciones se hacían a cada 0.6 cms, hasta

completar casi todo el tirante. Esto se hizo con objeto de registrar mejor la variación del perfil de velocidades cercano al fondo del canal. Entre cada posición de los puntos de lectura, se repetían los pasos b) y c).

e) Una vez completado el registro del perfil de velocidades se procedía a tomar las lecturas de los tres limnómetros, cuando se podía se aforaba el gasto a la salida del vertedor mediante una probeta y un cronómetro. Esto último sólo se logró hacer par gastos pequeños.

f) se determinaba la velocidad superficial del flujo empleando bolitas de unicel de 0.5 cm de diámetro depositadas sobre la superficie libre del agua; ésta se tomaba como el tiempo que dicha partícula tardaba en recorrer la distancia de la zona de medición (= 30 cm).

La secuencia de los pasos 2 a 6 se repetía cinco veces para cada tamaño de los granos que se mencionan en el cap 4, por tanto se cuenta con un total de 80 perfiles.

Las hojas de registro para los cinco gastos de la NM30 se muestran en las figs 5.5, la cual está dividida en cinco regiones: la primera tiene por objetivo llevar un control del material y de la prueba; la segunda, el control del perfil de velocidades; la tercera sirve para registrar la velocidad superficial y el gasto aforado directamente sobre el vertedor; en la cuarta registraban las lecturas de los tres limnómetros y finalmente en la quinta, se

anotaban el gasto obtenido a partir de la carga del vertedor triangular y la fórmula de la Universidad Católica de Chile para vertedores triangulares [30], el ancho del canal, la lectura h_r del tirante justo en la vertical del cruce de los rayos, la diferencia de tirantes Δh obtenidas de los limnómetros uno y dos ubicados sobre el canal, las velocidades medias del gasto de esta sección (\bar{V}_v) y del gasto de la sección dos (V_v) así como el promedio de estas dos últimas velocidades (\bar{V}_{prom}).

Los perfiles correspondientes a los materiales NM30, AM14, BM25 y CM14 se pueden observar en las figs 5.6.

5.4.4 Criterio para considerar el inicio de movimiento de las partículas estudiadas

Para determinar la condición de inicio de movimiento fue necesario establecer un criterio. Dado el carácter de los experimentos, esta condición se tomó cuando los granos comenzaban a moverse bajo ciertas condiciones hidráulicas; este movimiento no era continuo, sino que las partículas se desplazaban un tiempo y se detenían otro tanto, para después volverse a mover. Todo esto dentro de la zona de medición. El movimiento de las partículas se presentó de tres formas: algunas sólo se deslizaban, otras rodaban mientras que otras propiamente se arrastraban. Pudo observarse que el tipo de movimiento se debía a la forma de las partículas, que iban desde completamente lajeadas (NM14, las cuales deslizaban) hasta redondeadas (AM30, que prácticamente rodaban). Estas anotaciones aparecen en la parte de observaciones de las hojas de registro de

TESIS

Figura 5.5a

Material NM30 No prueba Fecha 22 09 87 Hora -- Temp. 17°C

h	V _{max}	V _{min}	V _{calibr.}
cm	cm/s		aparato
0.4	8.58	5.94	5.128
0.7	10.78	7.84	"
1.05	11.40	9.05	"
1.70	12.27	10.52	"
2.40	12.54	11.10	"
3.00	12.71	11.27	"
3.60	12.76	11.54	"
4.20	12.35	11.43	"
4.90	12.36	11.13	"
5.40	12.07	11.08	"
6.00	11.79	10.79	"
6.80	11.32	9.96	"
7.40	11.36	10.36	"
8.0	11.37	9.20	"

d	t	V _{superf.}	V	t	Q _v
cm	s	cm/s	cm ³	s	l/s
30	3.13	---	962	1.25	0.770
"	2.97	10.10	950	1.28	0.742
"	3.00	10.00	950	1.30	0.731
"	2.84	---	922	1.34	0.688
"	3.12	9.62	910	1.41	0.645
"	3.00	10.00	909	1.47	0.618
"	3.00	10.00	998	1.73	0.577
"	3.00	10.00	980	1.71	0.573
$\bar{V}_{superf.} = 9.93$ cm/s			$\bar{Q}_v = 0.668$ l/s		

VERTEDOR		limnómetro	1	2
tara T _v [cm]	2648	tara T [cm]	18.69	30.40
lectura l _v [cm]	3106	lectura l [cm]	26.29	38.28
carga h _v [cm]	4.58	nivel y [cm]		

Q _v	b	hr	Ah	V _v	V _v	V _{prom}
l/s	cm		cm	cm/s		
0.636	10.0	8.3	83.0	7.67	8.05	7.86

OBSERVACIONES: el 90% de las partículas "sembradas" rodaban,
el 10% se deslizaba sobre el fondo. La mayor parte de ellas
tenían forma laminar, pero por su tamaño la corriente las
hacía rodar.

TESIS

Figura 5.5b

Material NM30 No prueba b Fecha 22 09 87 Hora -- Temp. 17°C

h	V _{max}	V _{min}	V _{calibr.}
cm	cm/s		aparato
0.4	10.54	7.45	5.128
0.7	13.33	10.46	"
1.0	14.09	11.89	"
1.3	14.65	11.97	"
1.7	15.00	12.38	"
2.35	15.37	13.98	"
3.0	15.25	14.38	"
3.6	14.7	13.4	1.001
4.2	14.6	13.7	"
4.9	14.3	13.5	"
5.5	14.5	13.4	"
6.2	14.6	13.3	"
6.8	14.3	12.9	"
7.4	14.2	13.2	"

d	t	V _{superf.}	V	t	Q _v
cm	s	cm/s	cm ³	s	l/s
30	2.56	--	918	1.07	0.858
"	2.45	12.24	910	0.99	0.919
"	2.40	12.50	950	1.14	0.833
"	2.39	12.55	860	0.95	0.905
"	2.26	--	970	1.18	0.822
$\bar{V}_{superf.} = 12.43$ cm/s			$\bar{Q}_v = 0.868$ l/s		

VERTEDOR		limnómetro	1	2
foro T _v [cm]	2648	foro T [cm]	18.69	30.40
lectura l _v [cm]	3158	lectura l [cm]	25.70	37.69
carga h _v [cm]	5.1	nivel y [cm]		

Q _v	b	hr	Ah	∇ _v	∇ _v	∇ _{prom}
l/s	cm		cm	cm/s		
0.833	10.0	7.55	75.5	11.03	11.49	11.26

OBSERVACIONES: de manera empírica el 85% de las partículas de la prueba rodaban y el 15% restante se deslizaba.

TESIS

Figura 5.5c

Material NM30 No prueba C Fecha 22 09 87 Hora -- Temp. 17°C

h	V _{max}	V _{min}	V _{calibr.}
cm	cm/s		aparato
0.3	5.52	5.09	5.128
0.7	8.60	6.37	"
1.1	9.05	6.94	"
1.3	9.13	7.75	"
2.0	9.33	8.14	"
2.6	9.55	8.62	"
2.9	10.02	8.90	"

d	t	V _{superf.}	∇	t	Q _∇
cm	s	cm/s	cm ³	s	l/s
30	3.32	--	958	7.70	0.124
"	3.56	8.43	950	7.80	0.122
"	3.74	--	948	7.55	0.126
"	3.33	9.01	919	7.52	0.122
"	3.33	9.01	950	7.79	0.122
∇ _{superf.} = 8.82 cm/s			Q̄ _∇ = 0.123 l/s		

VERTEDOR		limnómetro	1	2
tara T _v [cm]	2648	tara T [cm]	18.69	30.40
lectura l _v [cm]	2898	lectura l [cm]	21.73	33.37
carga h _v [cm]	2.5	nivel y [cm]	3.04	2.97

Q _v	b	hr	Ah	∇ _v	∇ _∇	∇ _{prom}
l/s	cm		cm	cm/s		
0.135	10.0	3.30	33.0	4.10	3.73	3.92

OBSERVACIONES: el 10% de las partículas (aproximadamente) se deslizaban, el 90% restante tendían a rodar o rodaban.

TESIS

Figura 5.5d

Material NM30 No prueba 12 Fecha 22 09 87 Hora -- Temp. 17°C

h	Vmax	Vmin	Vcalibr.
cm	cm/s		aparato
0.50	7.03	5.27	5.128
0.80	9.52	6.44	"
1.10	9.77	8.25	"
1.40	10.21	8.77	"
2.00	10.67	9.43	"
2.60	11.07	9.94	"
3.35	10.92	10.35	"
3.90	11.09	10.38	"
4.50	11.41	10.37	"

d	t	Vsuperf.	∇	t	Q_v
cm	s	cm/s	cm ³	s	l/s
30	3.26	---	920	3.39	0.271
"	3.08	9.74	913	3.39	0.269
"	2.94	10.20	933	3.44	0.271
"	2.70	---	940	3.51	0.268
"	3.05	9.84	916	3.34	0.274
"	2.91	10.31	916	3.34	0.274
$\bar{V}_{superf.} = 10.02$ cm/s			$\bar{Q}_v = 0.271$ l/s		

VERTEDOR		limnómetro	1	2
tara T_v [cm]	2648	tara T [cm]	18.69	30.40
lectura l_v [cm]	2982	lectura l [cm]	23.05	34.74
carga h_v [cm]	3.34	nivel y [cm]	4.36	4.34

Q_v	b	hr	Ah	∇_v	∇_v	∇_{prom}
l/s	cm		cm	cm/s		
0.286	10.0	4.65	46.5	6.14	5.82	5.98

OBSERVACIONES: aproximadamente un 95% de las partículas "sembradas" rodaban, el resto se deslizaban sobre el fondo del

canal

TESIS

Figura 5.5e

Material NM30 No prueba e Fecha 22 09 87 Hora -- Temp. 17°C

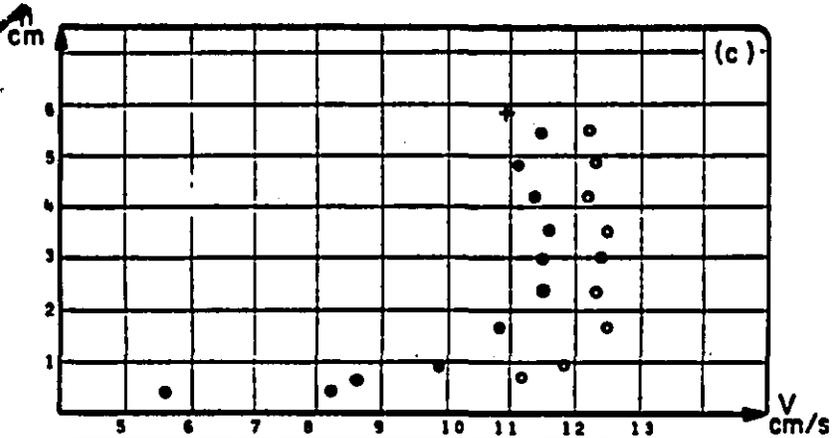
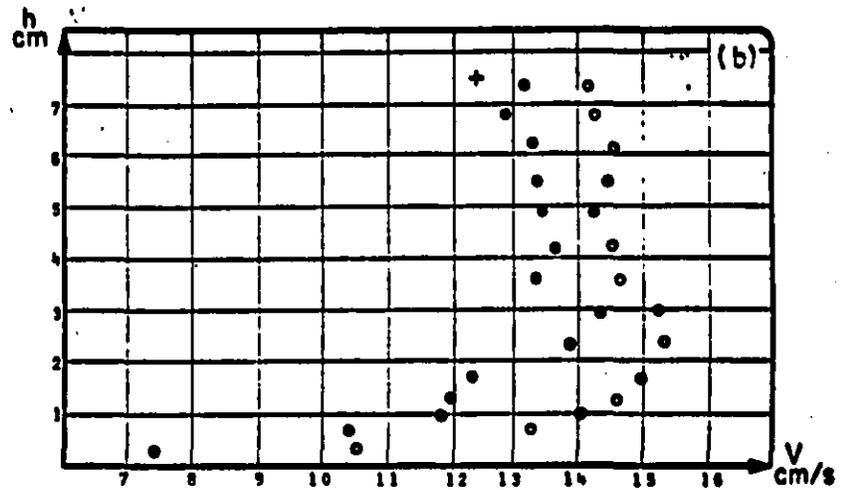
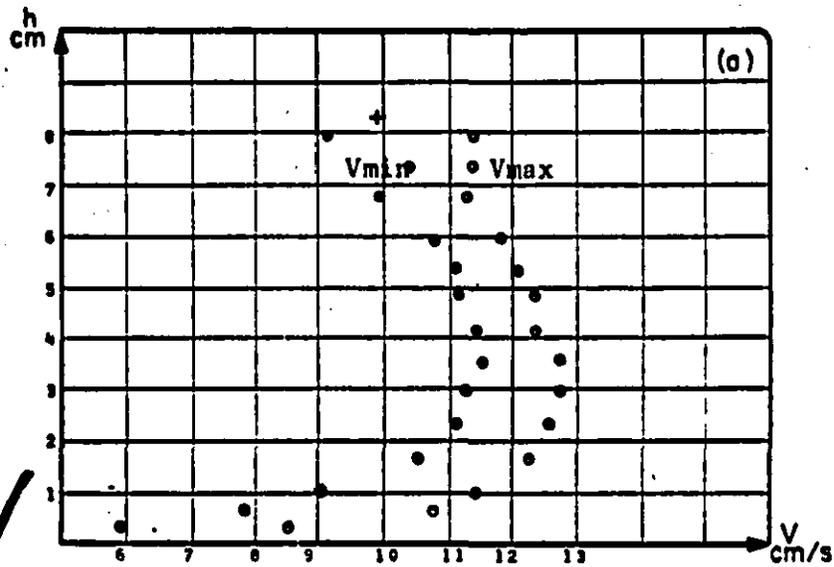
h	V _{max}	V _{min}	V _{calibr.}
cm	cm/s		aparato
0.5	8.20	5.62	5.128
0.7	11.13	8.60	"
1.0	11.85	9.92	"
1.7	12.48	10.82	"
2.4	12.30	11.50	1.001
3.0	12.40	11.50	"
3.6	12.50	11.60	"
4.3	12.20	11.40	"
4.9	12.30	11.10	"
5.5	12.20	11.50	"

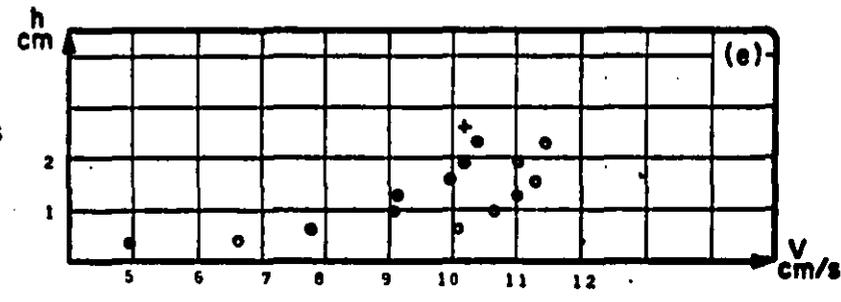
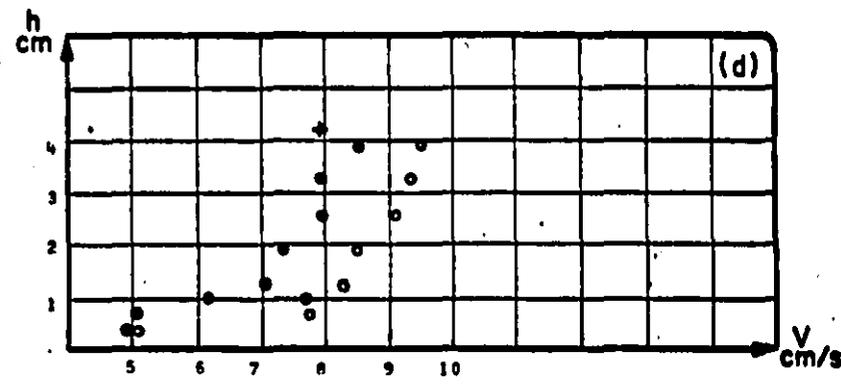
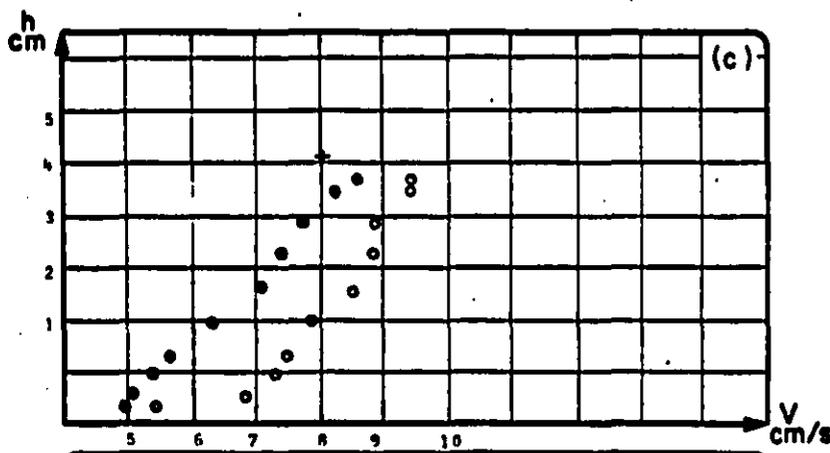
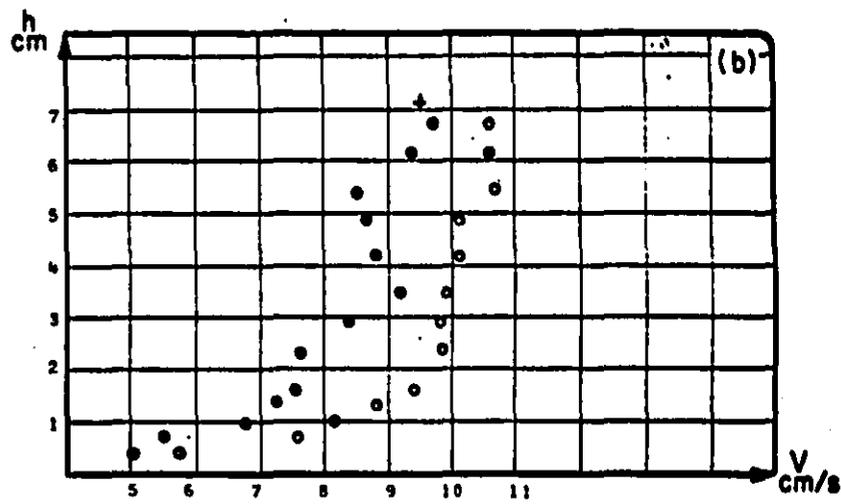
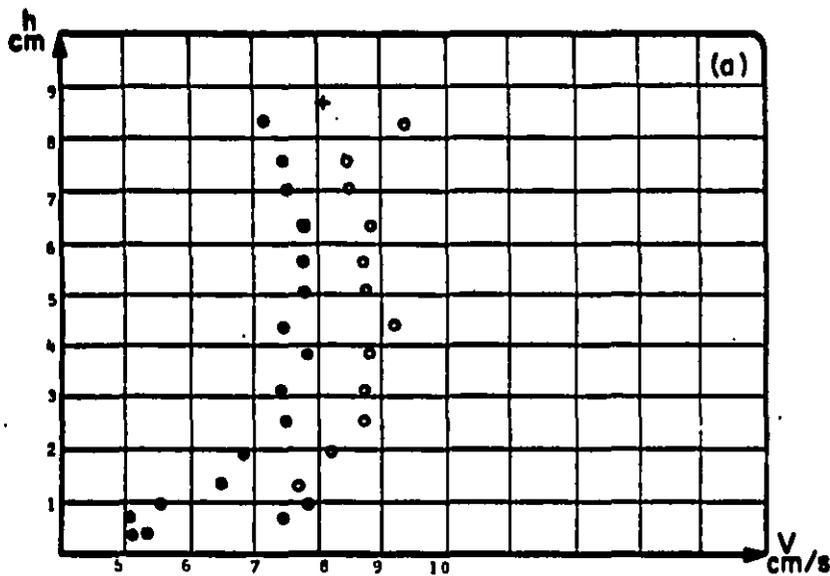
d	t	V _{superf.}	V	t	Q _v
cm	s	cm/s	cm ³	s	l/s
30	2.67	--	945	1.98	0.427
"	2.81	10.68	930	1.97	0.472
"	2.74	10.95	977	2.05	0.477
"	2.85	--	942	2.02	0.466
"	2.67	11.24	940	1.94	0.485
V _{superf.} = 10.96 cm/s			Q _v = 0.475 l/s		

VERTEDOR		limnómetro	1	2
tara T _v [cm]	2648	tara T [cm]	18.69	30.40
lectura l _v [cm]	3059	lectura l [cm]	23.97	35.90
carga h _v [cm]	4.11	nivel y [cm]	5.28	5.50

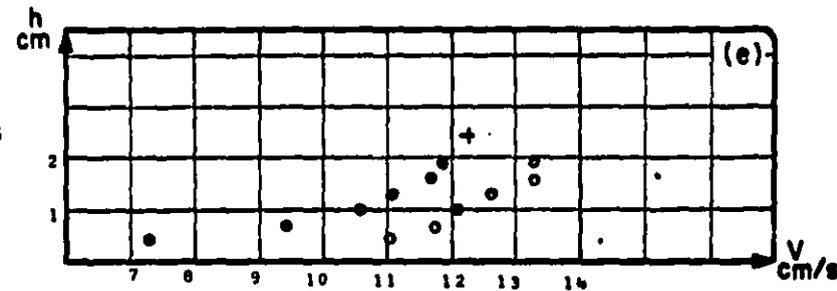
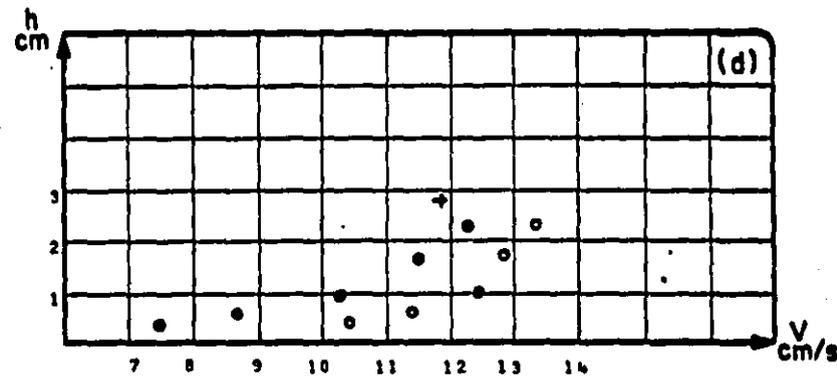
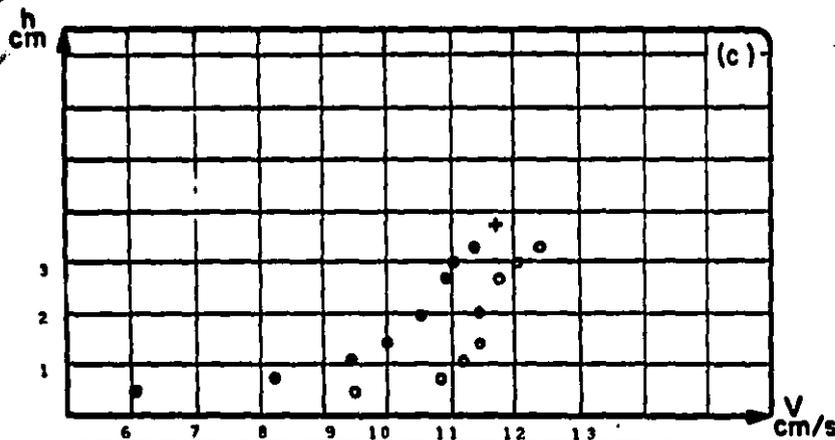
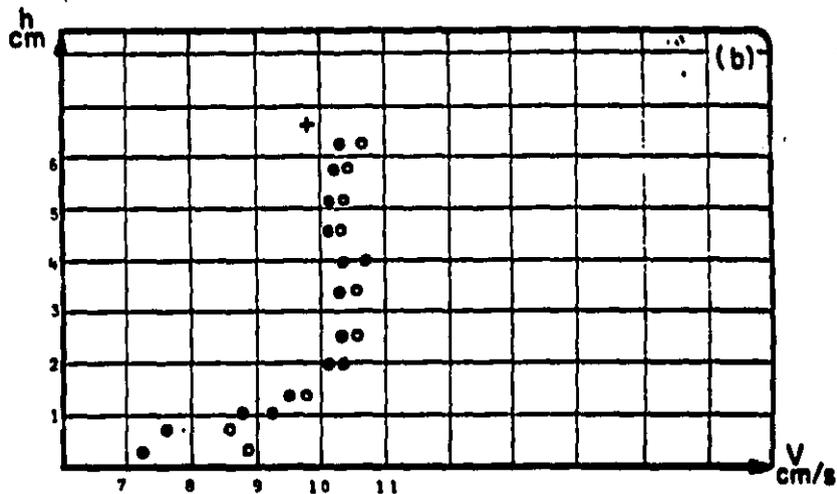
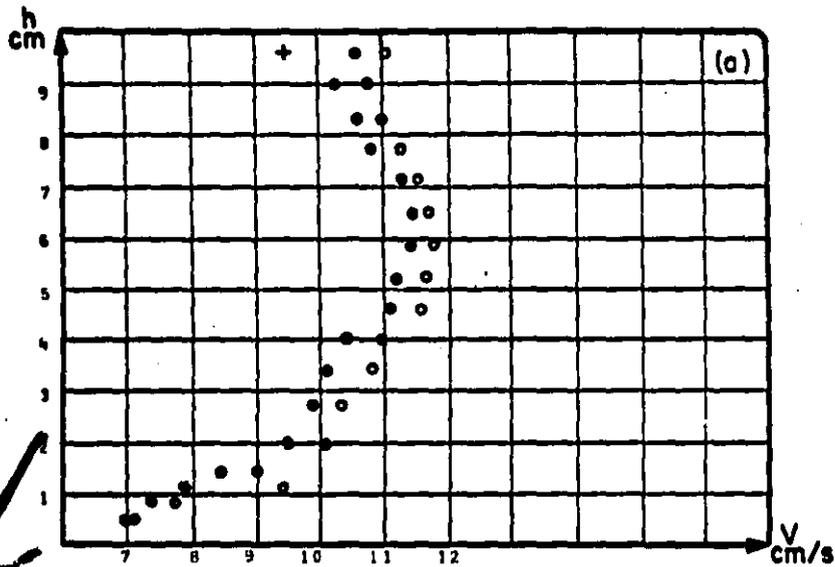
Q _v	b	hr	Ah	V _v	V _v	V _{prom}
l/s	cm		cm	cm/s		
0.485	10.0	5.90	59.0	8.23	8.06	8.15

OBSERVACIONES: todas las partículas sembradas se deslizaban,
generalmente se presentaba forma de laminilla en ellas, se uti-
lizaron dos velocidades de calibración y dos rangos de velocidad.

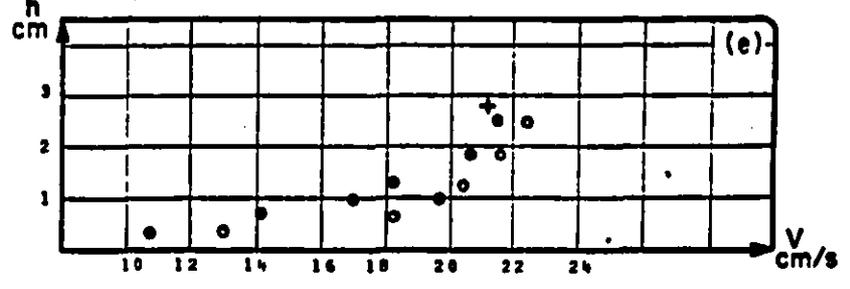
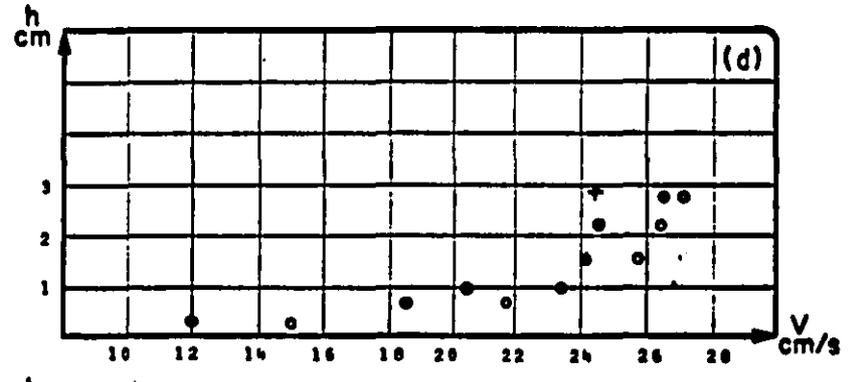
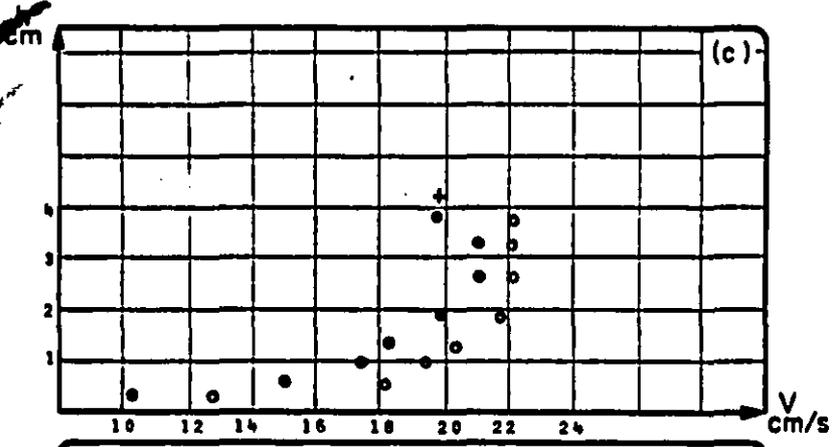
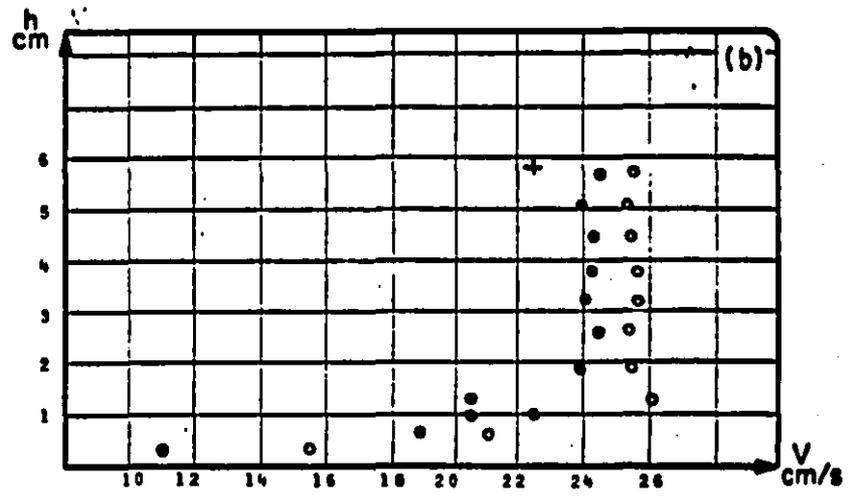
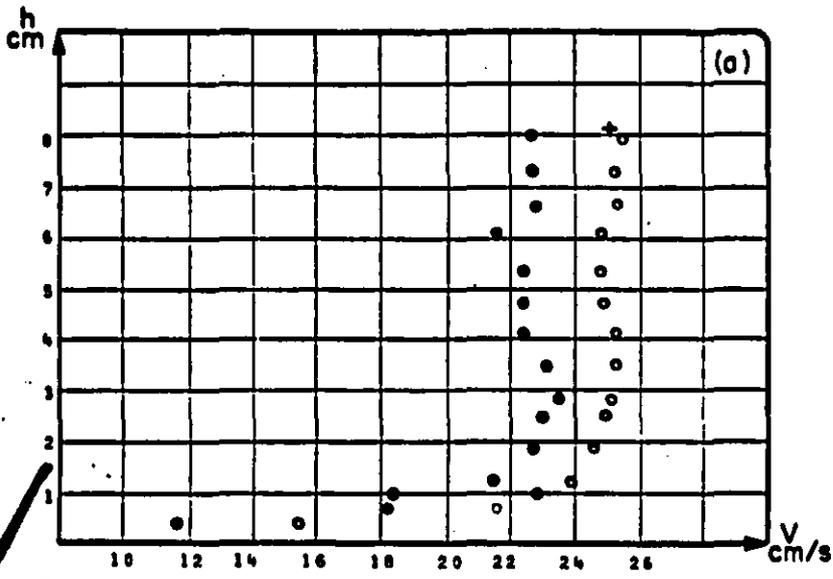




TFSIS			
Material	Fecha	Esc.vert 1:1.25	Fig. 5.6b
CM30	161087	Esc hor 1:1	



TESIS			
Material	Fecha	Esc.vert 1:1.25	Fig. 5.6c
BM25	090987	Esc hor 1:1	



TESIS			
Material	Fecha	Esc.vert 1:1.25	Fig. 5.6d
AM14	260987	Esc hor 1: 2	

las figs 5.5.

5.5 El flujo turbulento

Antes de continuar con el manejo de los datos es necesario mencionar lo siguiente, El flujo observado, fue en todo momento turbulento ya que el Número de Reynolds siempre cumplió con el siguiente criterio

$$R = \frac{4 U_* R_h}{\nu} > 2000 \quad (5.32)$$

Por otro lado el flujo se considera hidráulicamente liso ya que también el espesor de la subcapa viscosa siempre es mayor que el tamaño de las protuberancias de la pared del fondo, esto se puede expresar por medio del siguiente parámetro denominado Número de Reynolds asociado a la rugosidad

$$R_{ks} = \frac{V_* K_s}{\nu} \leq (4 \text{ a } 8, \text{ medio} = 5) \quad (5.33)$$

Conviene tomar en cuenta que para algunos autores este flujo es independiente de las asperezas de la frontera y que unicamente depende de la viscosidad del fluido, de las características hidráulicas y de la geometría del canal.

En el escurrimiento turbulento con pared hidráulicamente lisa se distinguen tres zonas y en cada una de ellas se necesita una

ecuación para determinar la correspondiente distribución de velocidades. La zona inferior cercana al fondo es la llamada subcapa viscosa y el flujo dentro de ella es aparentemente laminar; la región en la cual el flujo es propiamente turbulento es llamada zona turbulenta; a una región entre esas dos se le denomina zona de amortiguamiento. La subcapa laminar y la zona de amortiguamiento constituyen la llamada región de pared. Los límites de los espesores de las tres capas se indican tabla 5.1

zona o región	límite
subcapa viscosa	$0 < y \leq 5\nu/V_*$
amortiguamiento	$5\nu/V_* \leq y \leq 30\nu/V_*$
turbulenta	$30\nu/V_* \leq y \leq h$

Tabla 5.1 Límites de las regiones para un flujo turbulento.

5.6 Manejo de los datos

En esta parte se comparan los los criterios que se describieron anteriormente con los resultados de las mediciones que se obtuvieron; por tanto, para los datos registrados se tuvo necesidad de calcular la, velocidad media y la velocidad de fondo, así como los parámetro τ_* y el R_* . De aquí en adelante se omitirá el suíndice c, no sólo en estos parámetros sino también en cualquier otro que pudiera aparecer ya que todas las condiciones que se manejan son establecidas para la condición crítica de

movimiento.

5.6.1 El diámetro seleccionado.

En la mayoría de las fórmulas anteriores se incluye el diámetro de la partícula (o alguna longitud representativa de la misma); en este subcapítulo se describe una consideración que se creyó conveniente para los fines que se persiguen. Así, para la magnitud D se tomó el promedio del tamaño de la malla en la cual se retenían los materiales y el tamaño de la malla inmediata superior. Por ejemplo para la malla 30 se consideró

$$D = \frac{D_{30} + D_{25}}{2}$$

Los datos de los tamaños de las mallas se tomaron de la tabla 4.2; los considerados en este caso al tomar el criterio anterior se indican en la tabla 5.2; esto se hizo con el fin de ajustar mejor el valor de D a las muestras ya que las mayas que se disponían no guardaban la misma relación entre ellas.

malla	D (m)
14	0.0019
16	0.0013
25	0.00095
30	0.00065

Tabla 5.2 Valores de D

5.5.1 Programa de computadora para el cálculo de las velocidades.

Dada la cantidad de cálculos que se requerían se creyó conveniente elaborar un programa de computadora en fortran 77 para microcomputadoras PC.

Debido a la irregularidad de los puntos obtenidos (fig 5.6) se creyó conveniente que la mejor manera de obtener un perfil que se ajustase a ellos sería el obtenido por medio de una interpolación polinomial; eligiéndose para ello un método de interpolación polinomial de Hermite, el cual para una función tabulada de valores $V_i = V(h_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$; arroja una serie de ecuaciones del tipo

$$V_j = AV_i + BV_{i+1} + CV_i'' + DV_{i+1}'' \quad (5.34)$$

definida para un intervalo j , entre los puntos i e $i+1$. A, B, C y D son constantes en función de la posición de la vertical de los puntos h_i y h_{i+1} ; V_i y V_{i+1} son los respectivos valores de la velocidad y, V_i'' y V_{i+1}'' son los valores de las segundas derivadas obtenidas al resolver $N-1$ ecuaciones del tipo de la ec 5.34

Para resolver las j ecuaciones se parte de la igualdad de las primeras derivadas para cada punto i por la izquierda con las de la derecha, obteniéndose con ello un sistema tridiagonal de $j = N-1$ ecuaciones lineales cuya solución arroja los valores de las segundas derivadas. Para el extremo inferior del perfil ($i=1$), la

primera derivada por la izquierda se iguala a cero y para el punto superior ($i=N$) la primera derivada por la derecha, también se iguala con cero.

Conocidas las $N-1$ ecuaciones de los tramos se calcularon 100 puntos con cada uno de ellas, es decir se obtuvo una función V_{jk} en la que para cada j se calculaba $k = 1, 2, 3, \dots, 100$; finalmente la velocidad media se obtenía con

$$\bar{V} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=1}^{100} V(J,K)}{(N-1)100} \quad (5.35)$$

Por otra parte, para calcular la velocidad del fondo (V_b) se procedió de la siguiente forma

En todo momento se trabajó con flujo turbulento, hidráulicamente liso, cumpliéndose la ec 5.33; al depositarse los granos pueda demostrarse que ahora el Número de Reynolds asociado a ellos ($D = K_s$, en la ec 5.33) es mayor que θ , fig 5.7. Por tanto la velocidad del fondo se consideró que estaría a una distancia a partir del fondo del canal de

$$y = 30\nu/V_* \quad (5.36)$$

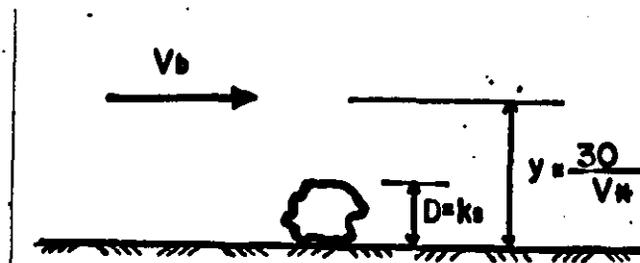


Figura 5.7 Posición de la velocidad de fondo, considerado en el programa.

Los resultados obtenidos con ella son del orden de 0.3 cm, que es la distancia mínima a la cual se podían tomar lecturas con el velocímetro. Esto favoreció a la comparación de los resultados medidos con los obtenidos por las fórmulas que se describen en el subcap 5.2.

Los resultados que se obtienen con el programa se indican en las figs.5.8 y 5.9.

5.7 Comparación de los resultados con los criterios de velocidad crítica.

En los siguientes incisos se comparan los resultados obtenidos en

MAT	Prueba	V, cm/s	Vb, cm/s	V*, cm/s	Rh, m	Reynolds	R*	Shields
NM14	1	0.1139	0.045	0.0123	0.031617	13287.51	21.55705	0.025365
	2	0.1093	0.0368	0.0129	0.029338	11831.88	22.60861	0.027900
	3	0.1202	0.02	0.0257	0.027272	12095.49	45.04197	0.110737
	4	0.1071	0.0505	0.00989	0.024226	9573.621	17.33327	0.016399
	5	0.1089	0.0699	0.00861	0.018354	7374.956	15.08993	0.012428
NM16	1	0.109	0.0416	0.01395	0.032142	12927.11	16.72816	0.049393
	2	0.1027	0.0509	0.01029	0.029166	11052.17	12.33926	0.026869
	3	0.1162	0.0464	0.01121	0.025961	11130.82	13.44248	0.031888
	4	0.0905	0.043	0.01038	0.022222	7420.389	12.44719	0.027341
	5	0.0897	0.0587	0.01075	0.017948	5940.411	12.89087	0.029325
NM25	1	0.094	0.172	0.003498	0.030314	10514.18	0.613061	0.020579
	2	0.1193	0.088	0.00673	0.028070	12355.95	1.179503	0.076175
	3	0.0985	0.0589	0.008319	0.024489	8900.451	1.457992	0.116393
NM30	4	0.1038	0.0979	0.005766	0.020588	7885.098	1.010552	0.055915
	5	0.0866	0.0663	0.007309	0.013235	4229.043	1.280979	0.089846
	1	0.0751	0.0768	0.0075	0.019879	5508.539	4.496817	0.031527
	2	0.0898	0.0944	0.00424	0.024093	7982.935	2.542200	0.010076
	3	0.1056	0.0215	0.0209	0.027064	10545.08	12.53113	0.244828
CM14	4	0.1308	0.0412	0.01776	0.030079	14516.82	10.64846	0.176789
	5	0.1065	0.0257	0.023	0.031203	12261.30	13.79024	0.296500
	1	0.095	0.04084	0.01011	0.031671	14639.22	18.63142	0.045966
	2	0.0745	0.0345	0.01248	0.029674	12746.00	21.34293	0.070043
	3	0.07574	0.039	0.01087	0.026635	11440.56	18.58955	0.053136
CM16	4	0.07303	0.05036	0.01007	0.022826	9804.328	17.22142	0.045603
	5	0.06287	0.0462	0.01015	0.018354	7976.989	17.56375	0.046330
	1	0.10815	0.0314	0.00983	0.032394	13160.95	11.78874	0.068818
	2	0.08673	0.0391	0.0224	0.029707	12689.92	28.24442	0.357352
	3	0.08362	0.0459	0.01851	0.027876	11907.50	23.33947	0.244013
CM25	4	0.08147	0.0399	0.01232	0.023794	10164.03	15.53443	0.108099
	5	0.0902	0.0174	0.00641	0.013235	5653.563	8.082444	0.029262
	1	0.07713	0.0492	0.01791	0.032142	12136.06	16.17347	0.346616
	2	0.07887	0.0299	0.02152	0.030916	11043.02	18.38489	0.500429
	3	0.08464	0.0481	0.0119	0.029166	10418.16	10.16636	0.153021
CM30	4	0.07556	0.0394	0.01269	0.026851	9591.326	10.84127	0.174012
	5	0.08872	0.0457	0.00869	0.022826	8153.346	7.424010	0.081601
	1	0.07491	0.0397	0.01928	0.031751	10486.30	11.56088	0.651341
	2	0.08285	0.04042	0.0152	0.029338	9689.396	9.114391	0.404838
	3	0.06978	0.042	0.01813	0.025247	8338.204	10.87130	0.575957
	4	0.07018	0.0415	0.01033	0.022826	7731.068	6.352412	0.186980
	5	0.08869	0.0496	0.0069	0.017105	5717.725	4.187675	0.083424

Figura 5.8 Resultados obtenidos con el programa.

MAT	Prueba	V, cm/s	Vb, cm/s	V*, cm/s	Rh, m	Reynolds	R*	Shields
AM14	1	0.2202	0.0533	0.0206	0.030916	25118.38	36.10368	0.016626
	2	0.2197	0.1009	0.01419	0.026958	21853.29	24.86947	0.007889
	3	0.1787	0.0709	0.0179	0.022677	14952.44	31.37164	0.012554
	4	0.1652	0.06124	0.01806	0.017948	10940.42	31.65206	0.012779
	5	0.2032	0.3105	0.0047	0.015753	11811.07	8.237247	0.000865
AM16	1	0.1648	0.0392	0.0208	0.031481	19142.69	24.94234	0.024068
	2	0.1777	0.0569	0.019	0.028902	18950.48	22.78387	0.020083
	3	0.1671	0.0573	0.01731	0.024747	15258.01	20.75731	0.016669
	4	0.1638	0.0632	0.01852	0.020238	12231.34	22.20828	0.019081
	5	0.1866	0.286	0.00466	0.017948	12357.64	5.588045	0.001208
AM25	1	0.1395	0.0403	0.0216	0.031273	16096.81	18.92814	0.035272
	2	0.1569	0.048	0.0203	0.029166	16884.97	17.78894	0.031154
	3	0.1745	0.0642	0.01787	0.023958	15425.62	15.65953	0.024142
	4	0.1427	0.0603	0.01879	0.019879	10466.95	16.46573	0.026692
	5	0.1799	0.0818	0.01556	0.016216	10763.94	13.63527	0.018304
AM30	1	0.1308	0.0221	0.0205	0.031412	15160.12	12.29130	0.045991
	2	0.1417	0.0394	0.0164	0.028813	15064.59	9.833041	0.029434
	3	0.148	0.0518	0.01806	0.025247	13787.04	10.82833	0.035694
	4	0.1454	0.0581	0.01652	0.019879	10665.00	9.904990	0.029866
	5	0.149	0.0627	0.0162	0.017105	9403.971	9.713126	0.028721
BM14	1	0.104	0.0504	0.0108	0.019474	7473.099	18.92814	0.013624
	2	0.0671	0.0688	0.01994	0.025222	6244.674	34.94696	0.046444
	3	0.1019	0.0451	0.01356	0.028485	10709.93	23.76533	0.021478
	4	0.1337	0.0598	0.01256	0.030079	14838.68	22.01272	0.018427
	5	0.1355	0.0946	0.01215	0.033221	16609.20	21.29416	0.017243
BM16	1	0.0841	0.0792	0.00812	0.010876	3374.975	9.737109	0.011263
	2	0.01266	0.12	0.00921	0.016170	755.3492	11.04418	0.014490
	3	0.1109	0.1172	0.00944	0.024515	10031.55	11.31998	0.015223
	4	0.1307	0.0799	0.0114	0.029287	14123.69	13.67032	0.022201
	5	0.1066	0.0762	0.01099	0.029919	11768.05	13.17867	0.020633
BM25	1	0.098	0.0512	0.00892	0.032829	11870.88	7.816622	0.019421
	2	0.0951	0.079	0.0083	0.028559	10021.13	7.273314	0.016815
	3	0.0983	0.0545	0.00927	0.021264	7712.525	8.123328	0.020975
	4	0.0982	0.0853	0.0085	0.017948	6503.326	7.448574	0.017635
	5	0.103	0.0645	0.00923	0.016216	6162.790	8.088275	0.020794
BM30	1	0.0821	0.0716	0.00627	0.022222	6731.646	3.759339	0.014024
	2	0.0885	0.0634	0.00734	0.016216	5295.213	4.400885	0.019219
	3	0.0926	0.0551	0.00795	0.026099	8917.283	4.766626	0.022547
	4	0.1019	0.0437	0.01013	0.028260	10625.52	6.073701	0.036608
	5	0.1143	0.1054	0.00508	0.032014	13501.50	3.045844	0.009206

Figura 5.

Resultados obtenidos con el programa.

la experimentación con los que arrojan los criterios dados en los subcaps 5.2 y 5.3: al final de cada criterio se incluyen algunos comentarios deducidos de dicha comparación.

5.7.1 Criterios que incluyen velocidades de fondo (V_b).

No se discuten todos los criterios, ya que para algunos se carecen de los parámetros apropiados para su evaluación y más aún salen del resto de la generalidad de la mayoría de ellos.

Las ecs 5.1 y 5.5 se pueden agrupar en un mismo modelo, ya que ambas son de la forma

$$V_b = C \sqrt{D} \quad (5.37a)$$

La cual es independiente del tirante; por tanto de las cinco mediciones que se poseen para cada material (fig 5.8, col 4) se calculó el promedio y, conocido el diámetro de las partículas (tabla 5.2) se obtuvo el valor de C de la ec 5.37a puesta de la siguiente forma

$$C = V_b/D^{1/2} \quad (5.37b)$$

Los resultados se indican en la tabla 5.3; en la columna uno de dicha tabla se indica el tamaño y el tipo de material; en la dos

el promedio de las velocidades de fondo para cada material, en la tres el valor C de la ec 5.37b; en la cuatro se da el valor promedio de C por material.

Resulta evidente que en las formulaciones del tipo del a 5.37, hace falta incluir algunas propiedades tanto de los sedimentos como del agua; el parámetro Δ pudiera ser una buena opción.

De los resultados obtenidos se observa que el valor de C promedio oscila alrededor del que resulta para la malla 16, el cual es cercano a dos. Este valor resulta por debajo de lo que indica tanto la ec 5.1 como la 5.5. Este tipo de ecuaciones no garantizan un buen criterio para la determinación de la velocidad de fondo, aún cuando se hicieran mediciones de campo encaminadas a determinar el dicho coeficiente C, ya que éste, además de variar en el tiempo también varía de sección a sección.

En la misma tabla 5.3 se anexa el valor del parámetro Δ y el coeficiente de sedimento A dado por la ec 5.2; de los resultados obtenidos para esta ecuación puede verse una ligera influencia del parámetro Δ ; no obstante la variable D es la que influye de manera determinante en este criterio. La fórmula arroja valores uniformes para la arena y para la baquelita, no así para el café y la nuez. Esto quizá se deba a que dicho criterio fue establecido para arenas y las densidades de los dos materiales a los que se ajusta no difieran en mucho de las que originalmente se tomaron en cuenta para su evaluación ($\Delta = 1.65, (10)$).

1	2	3	4	5	6
mat	V _b (m/s)	C	\bar{C}	Δ	A
NM14	0.0444	1.020		0.320	0.3305
NM16	0.0481	1.330	1.830	0.309	0.5871
NM25	0.0966	3.134		0.319	3.1389
NM30	0.0519	2.036		0.230	1.5097
BM14	0.0638	1.464		0.459	0.4755
BM16	0.0945	2.621	2.322	0.459	1.5256
BM25	0.0669	2.171		0.440	1.0925
BM30	0.0678	3.032		0.440	1.6399
CM14	0.0422	0.968		0.119	0.8009
CM16	0.0408	1.132	1.288	0.110	1.1856
CM25	0.0425	1.379		0.099	1.9518
CM30	0.0426	1.671		0.090	3.1799
AM14	0.1193	2.737		1.370	0.5576
AM16	0.1005	2.787	2.318	1.410	0.5619
AM25	0.0589	1.911		1.420	0.2623
AM30	0.0468	1.836		1.432	0.2397

Tabla 5.3 Resultados obtenidos para las ecs 5.1 y 5.2

En la col 5 se adiciona el parámetro Δ , definido por la ec 5.3; las densidades se tomaron de la tabla 4.3.

Por otra parte, las ecs 5.6b, 5.7 y 5.9 se pueden discutir desde otro punto de vista, ya que pueden escribirse en la forma

$$V_b = C_1 D^{C_2} \Delta^{C_3} \quad (5.38)$$

En la cual C_1 , C_2 y C_3 son constantes que dependen de la ecuación. Para ello es necesario ajustar la ec 5.7 a las condiciones estudiadas; por tanto se tomará $\alpha = 0$ ya que la pendiente del fondo del canal es horizontal y con un ángulo de fricción promedio $\varphi = 30^\circ$ para los cuatro materiales, se puede escribir, tomando $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$V_b = 4.429 D^{1/2} \Delta^{1/2} \quad (5.39)$$

que ya es de la forma 5.38. Los valores de C_1 , C_2 y C_3 para las tres ecuaciones se indican en la tabla 5.4 y en la 5.5 se resumen los valores obtenidos con estas ecuaciones. En la fig 5.9 se muestra gráficamente esta comparación en la que también se han ubicado los valores obtenidos en las mediciones.

Ecuación	C_1	C_2	C_3
5.6b	0.9674	4/9	1/2
5.9	1.41	0.2	1
5.39	4.429	1/2	1/2

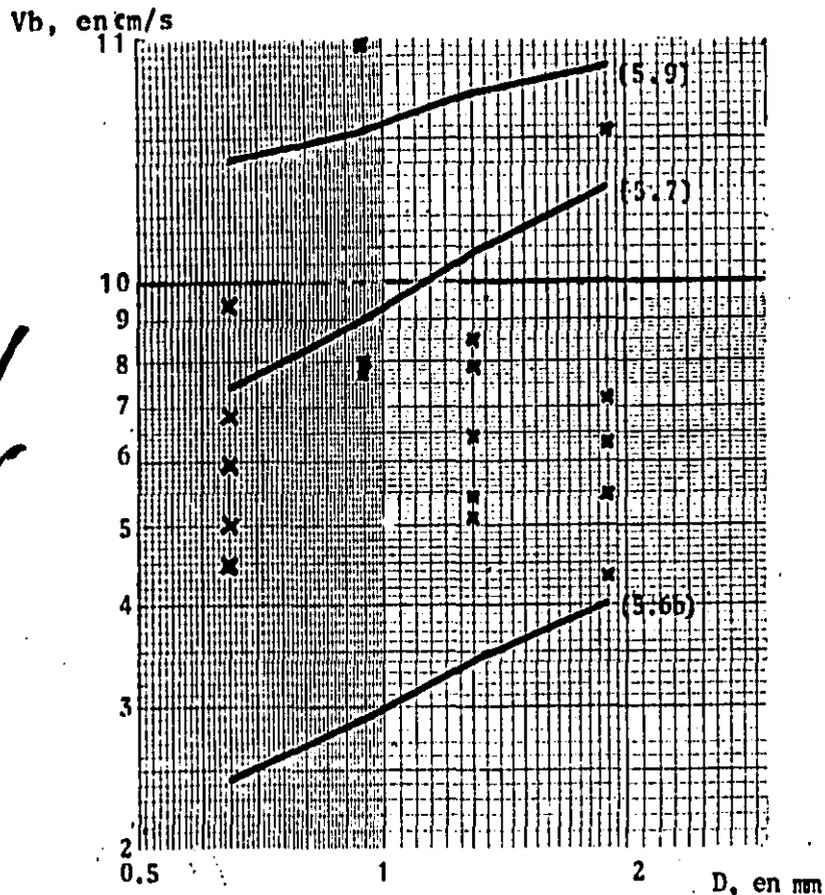
Tabla 5.4 Valores de C_1 , C_2 y C_3 (ec 5.38)

Puede verse que en general los valores obtenidos de la ec 5.9 resultan hasta 6 veces más grandes que los obtenidos con la ec 5.6b y el doble de los obtenidos con la ec 5.7. Para el caso de la nuez (fig 5.9b) los valores medidos se encuentran entre los obtenidos con las ecs 5.6b y 5.7; lo mismo ocurre para la

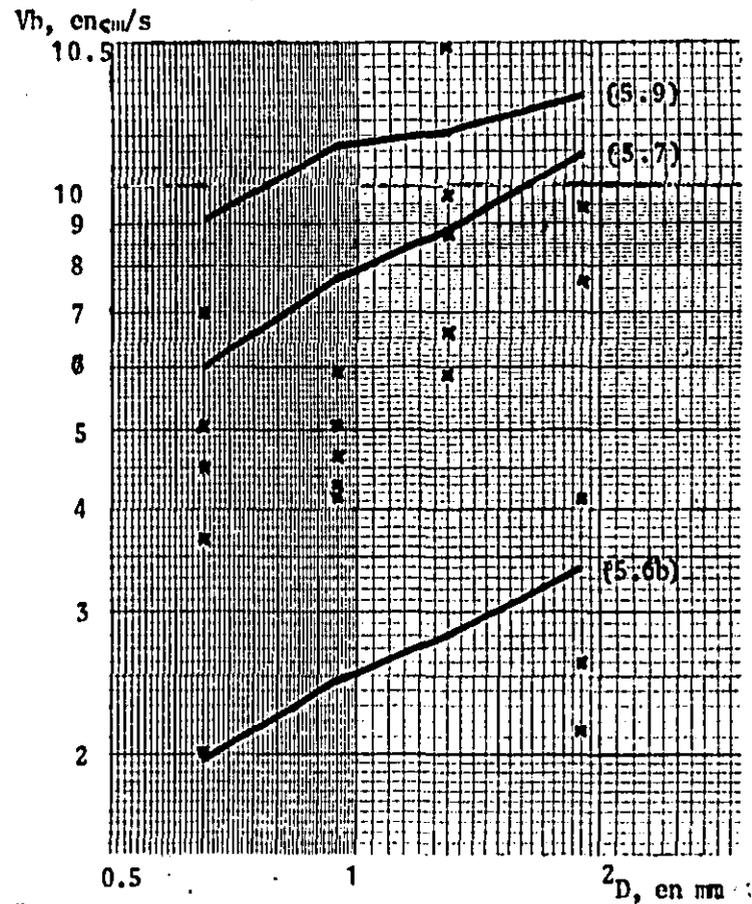
baquelita (fig 5.9a). Para el caso del café, las ecuaciones que dominan son las 5.9 y 5.7. Para la arena puede decirse que la ec 5.6b es del orden de las mediciones.

Mat.	Velocidad de fondo		
	Ecuación		
	5.6b	5.7	5.9
NM14	0.033	0.1092	0.1269
NM16	0.028	0.0888	0.1153
NM25	0.0248	0.0771	0.1119
NM30	0.0196	0.0597	0.0909
BM14	0.0405	0.1308	0.1858
BM16	0.0342	0.1082	0.1713
BM25	0.0291	0.0905	0.1541
BM30	0.0246	0.0749	0.1428
CM14	0.0206	0.0667	0.0480
CM16	0.0174	0.0508	0.0411
CM25	0.0138	0.0430	0.0348
CM30	0.0111	0.0338	0.0291
AM14	0.0699	0.2259	0.5514
AM16	0.0599	0.1896	0.5261
AM25	0.0523	0.0523	0.4976
AM30	0.0523	0.1626	0.4976

Tabla 5.5 Velocidades de fondo obtenidas con las ecs 5.6b, 5.7 y 5.9.

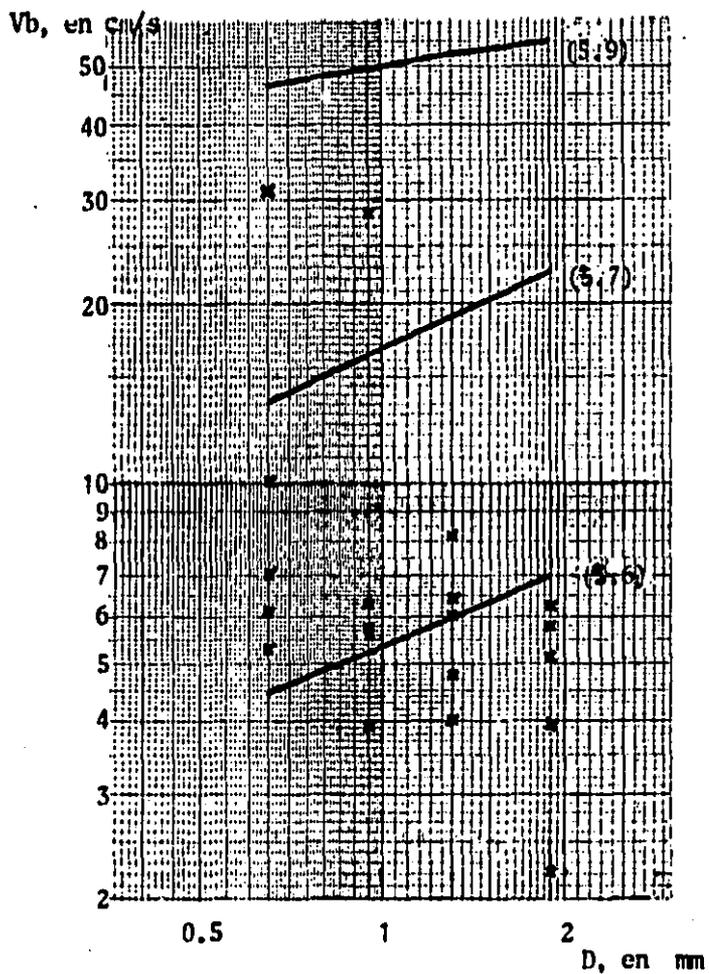


a) Baquelita

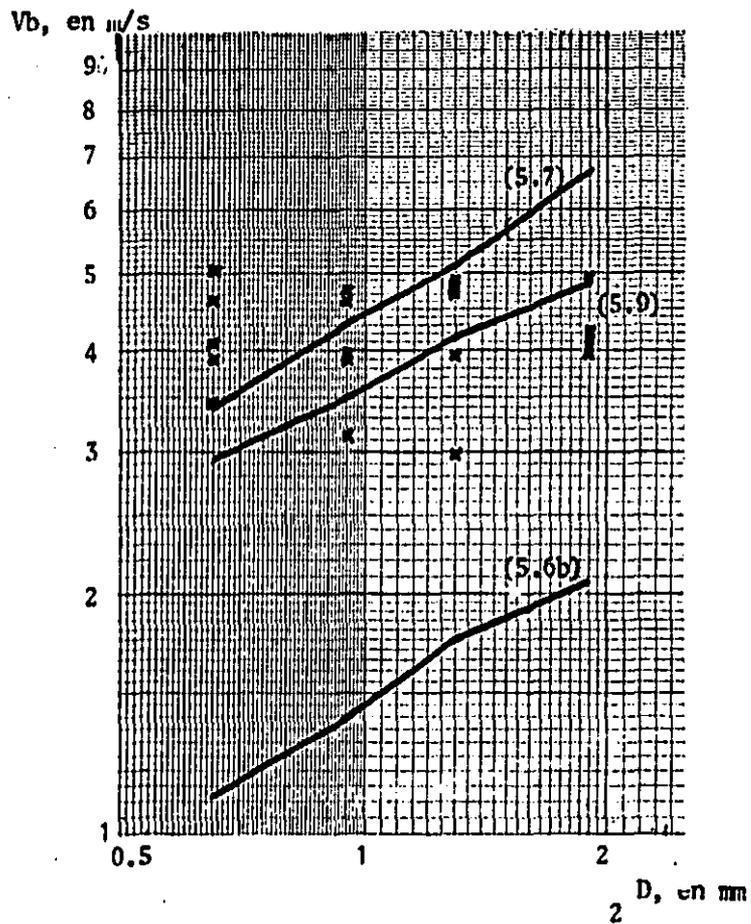


b) Nuez

Figura 5.9 Resultados obtenidos con las ecuaciones 5.6b, 5.7 y 5.9; se anexan los resultados experimentales.



c) Arena



c) Café

Figura 5.9 (continuación) Resultados obtenidos con las ecs 5.6b, 5.7 y 5.9; se anexan los resultados experimentales

5.7.2 Criterios que incluyen velocidades medias (\bar{V}).

Al comparar las fórmulas que se dan en el subcap 5.2.2 se observa que algunas de ellas, pueden discutirse en una gráfica adimensional dada por $F_D - d/D$, en la que F_D es definido por

$$F_D = \frac{\bar{V}}{\sqrt{gD}} \quad (5.40)$$

conocido como Número de Fruede partícula y d/D es un parámetro adimensional, formado por el tirante de la corriente y el diámetro de la partícula. Las ecuaciones que se discuten se indican en la tabla 5.6; las cuales son puestas en la forma

$$F_D = C_1 \Delta^{C_2} f(d/D) \quad (5.44)$$

en la que C_1 y C_2 son constantes cuyo valor depende de la ecuación en cuestión y $f(d/D)$ es una función definida según una ecuación.

Cabe mencionar que la ec 5.25 fue transformada de su forma original para ponerla en la forma de la 5.44. Dicha modificación consistió en lo siguiente

$$\bar{V}/D^{0.85} = 4.71 \Delta^{1/2} Rh^{0.15}$$

considerando $Rh = d$ y dividiendo entre $g^{1/2}$

$$\frac{\bar{V}}{D^{0.85} g^{1/2}} = \frac{4.71 \Delta^{1/2} d^{0.15}}{g^{1/2}}$$

dividiendo entre $D^{0.15}$

$$\frac{\bar{V}}{D^{0.15} D^{0.85} g^{1/2}} = \frac{4.71 \Delta^{1/2} d^{0.15}}{g^{1/2} D^{0.15}}$$

finalmente

$$F_D = 1.5 \Delta^{1/2} (d/D)^{0.15}$$

ecuación que ya es de la forma 5.44

Ecuación	C ₁	C ₂	f(d/D)
5.14	1.400	0	$1 + \text{Ln} \sqrt{d/7D}$
5.15	1.400	0	$\text{Ln} \sqrt{d/7D}$
5.17	1.07	1/2	$\text{Log}(8.8d/D)$
5.18	1.00	1/2	$\text{Log}(6d/D)$
5.19	1.581	1/2	$(d/D)^{0.1}$
5.23	1.28	1/2	$(d/D)^{1/6}$
5.26	1.50	1/2	$(d/D)^{0.15}$

Tabla 5.6 Definición de coeficientes C₁ y C₂ así como de las respectivas funciones f(d/D) para las ecuaciones empleadas.

Los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriores se indican en las figuras 5.10. Se recuerda que la ecuación 5.14 es

aplicable para cuando la relación $d/D < 60$; cuando es mayor, se aplica la 5.15. Estas dos ecuaciones se unieron entre sí en las gráficas que cumplen con las dos condiciones.

De los resultados obtenidos para la arena, figs 10a a 10d, puede verse que el grupo de ecuaciones marca la misma tendencia para los cuatro diámetros y que los puntos experimentales siempre caen por debajo de ellas. Las máximas diferencias para los puntos experimentales se tuvieron con respecto a la ec 5.17, que es la que arroja los mayores valores, siendo de alrededor del 100%; la mínima diferencia se obtuvo con respecto a la ec 5.14 y es de aproximadamente 60%.

Una situación similar se obtiene al analizar las gráficas para la baquelita, figs 10e a 10h, exceptuando que aquí las ecs 5.14 y 5.15 se salen del bloque de las demás ecuaciones; esto se debe a que estas ecuaciones no incluyen el parámetro Δ ($C_2 = 0$ en la tabla 5.6). Por lo demás las máximas diferencias de los puntos experimentales se obtienen con respecto a la ec 5.17 que llegan a ser hasta del 100% (BM25) y las mínimas con respecto a la ec 5.19 que son del orden del 15% (BM30).

Para la nuez se presenta un caso similar con las ecs 5.14 y 5.15, para las demás ecuaciones se tiene una situación semejante a las dos anteriores. En lo que respecta a los puntos experimentales, éstos caen por debajo en tres de los cuatro diámetros, figs 10i a 10k; no ocurre lo mismo para la NM30 ya que algunos de sus puntos caen en la zona de ecuaciones, fig 10l.

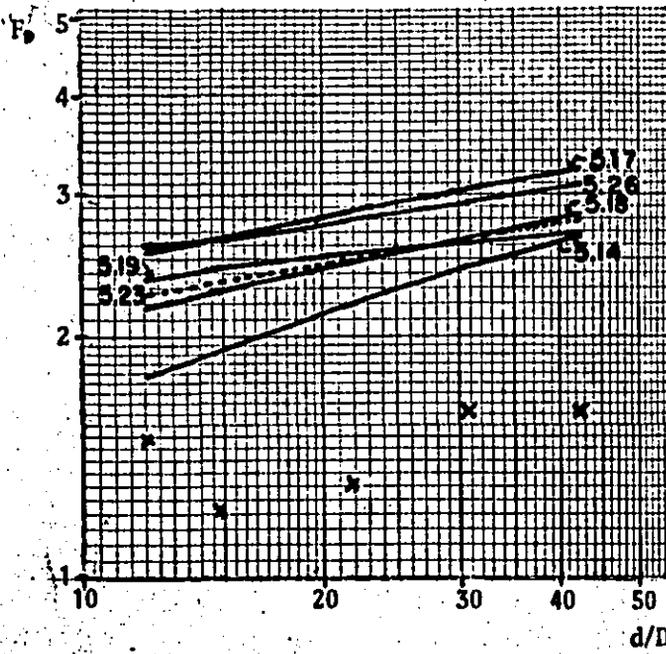


Figura 10a AM14

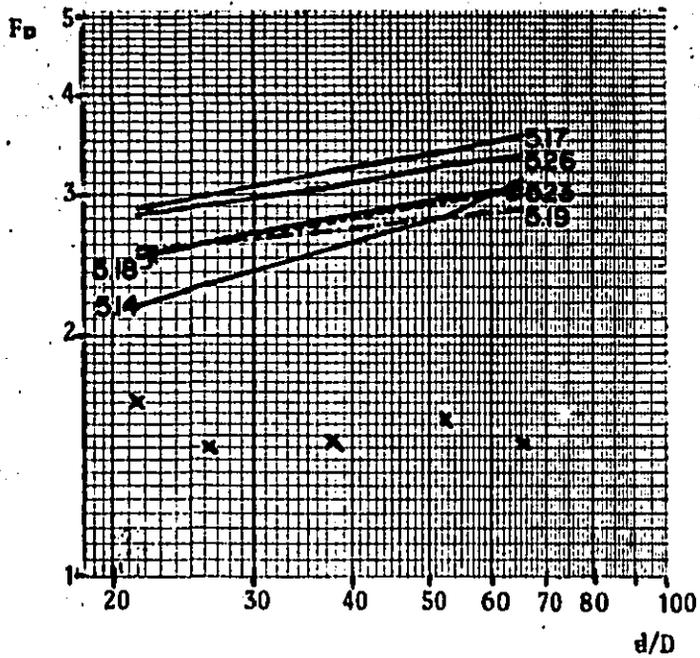


Figura 10b AM16

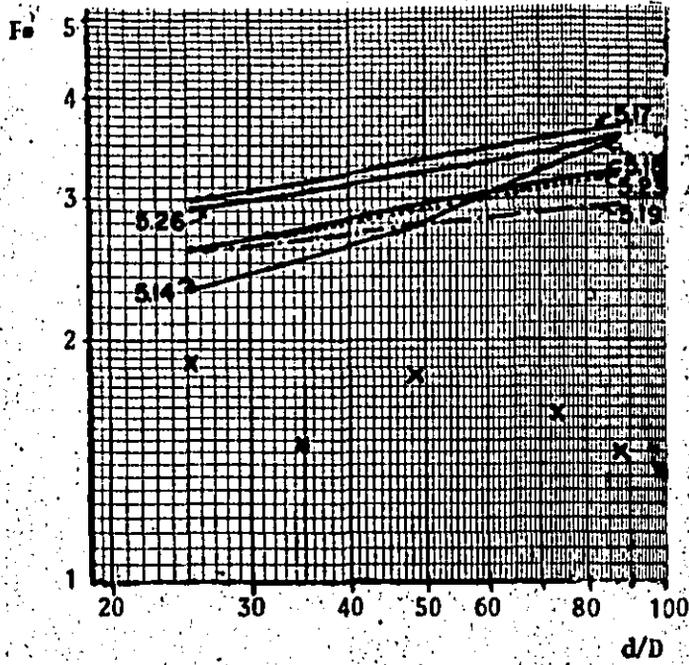


Figura 10c AM25

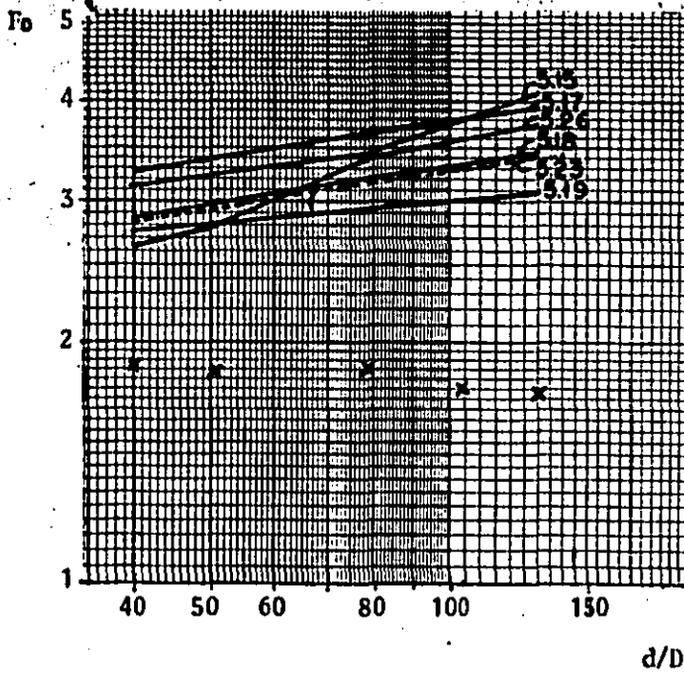


Figura 10d AM30

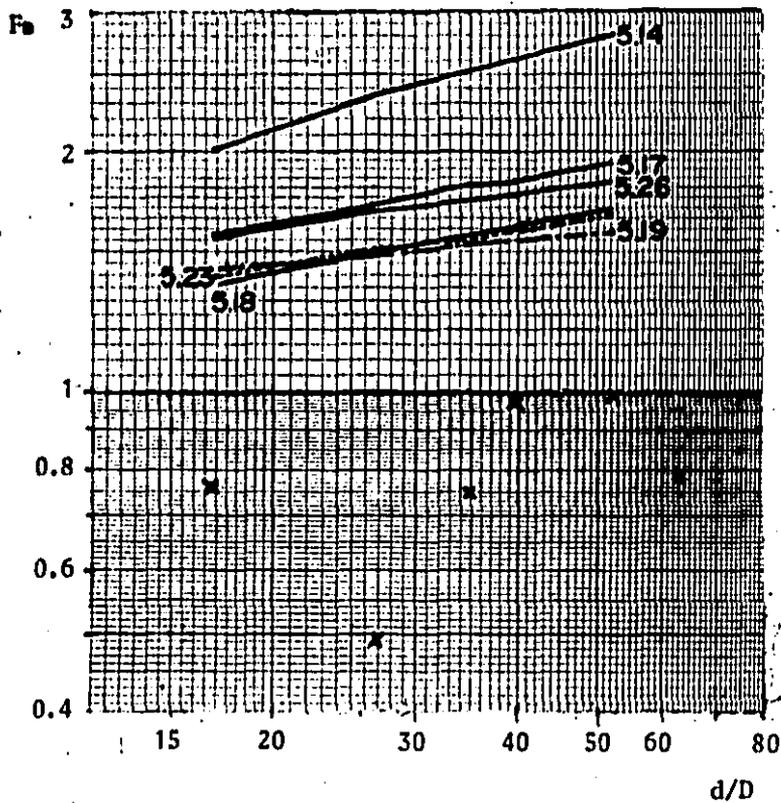


Figura 10e BM14

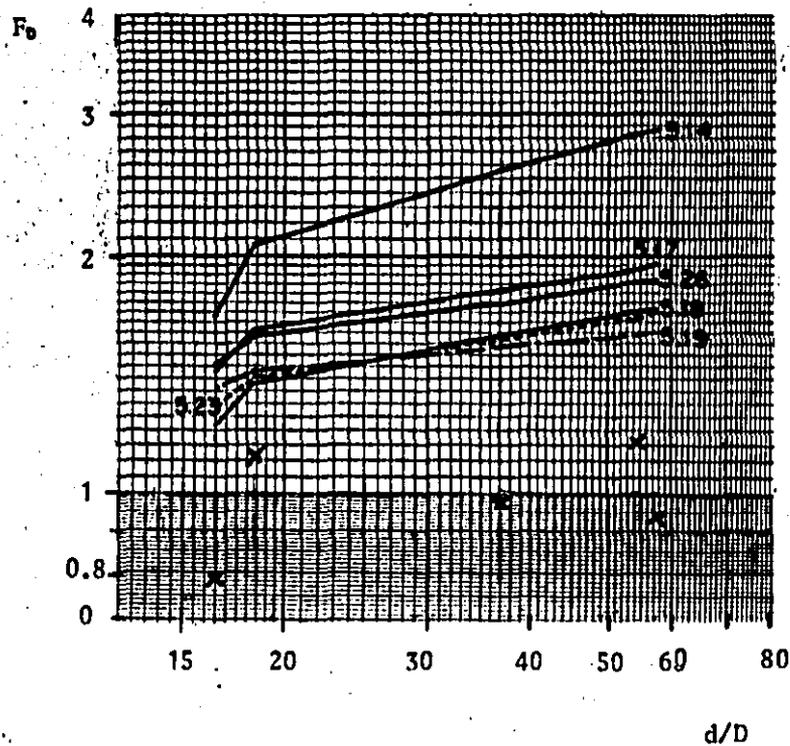


Figura 10f BM16

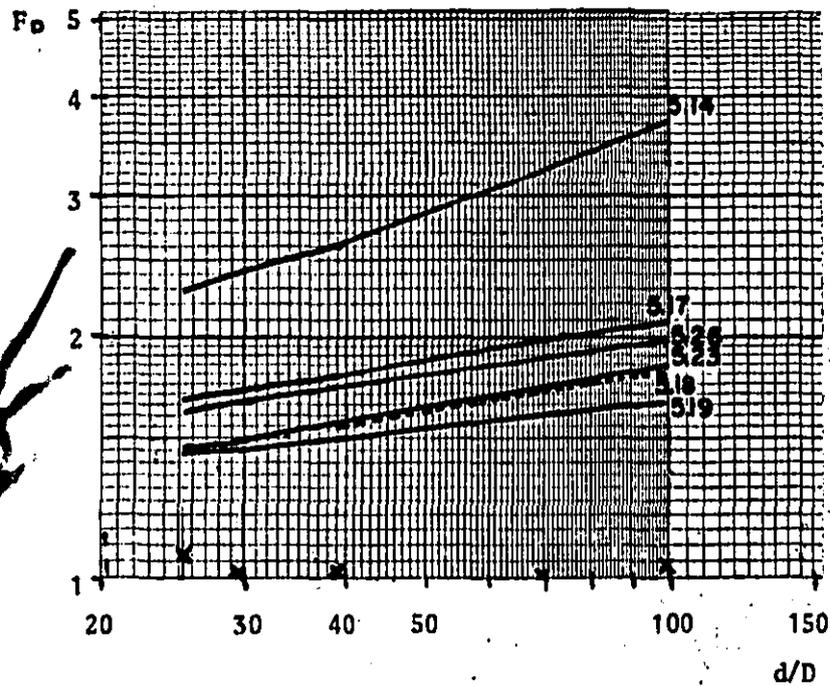


Figura 10g BM25

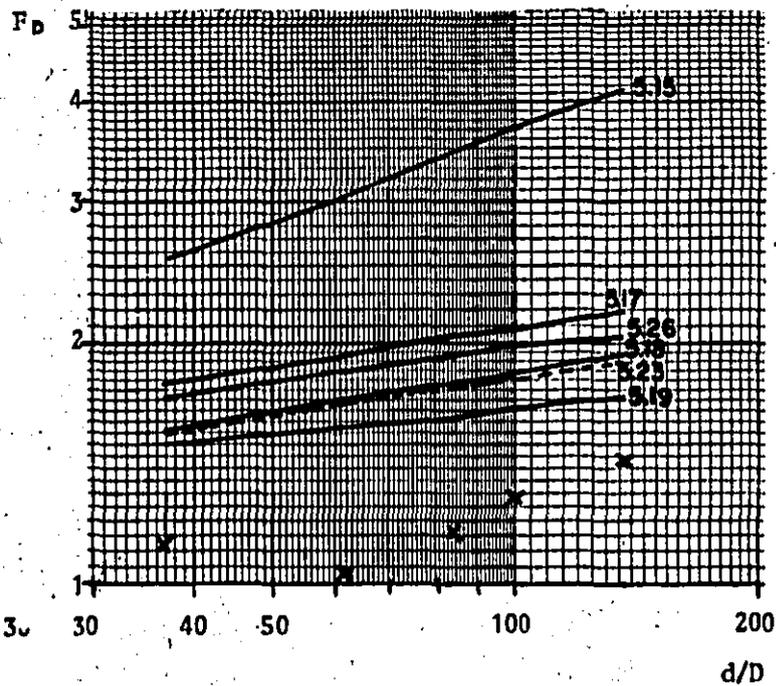


Figura 10h BM30

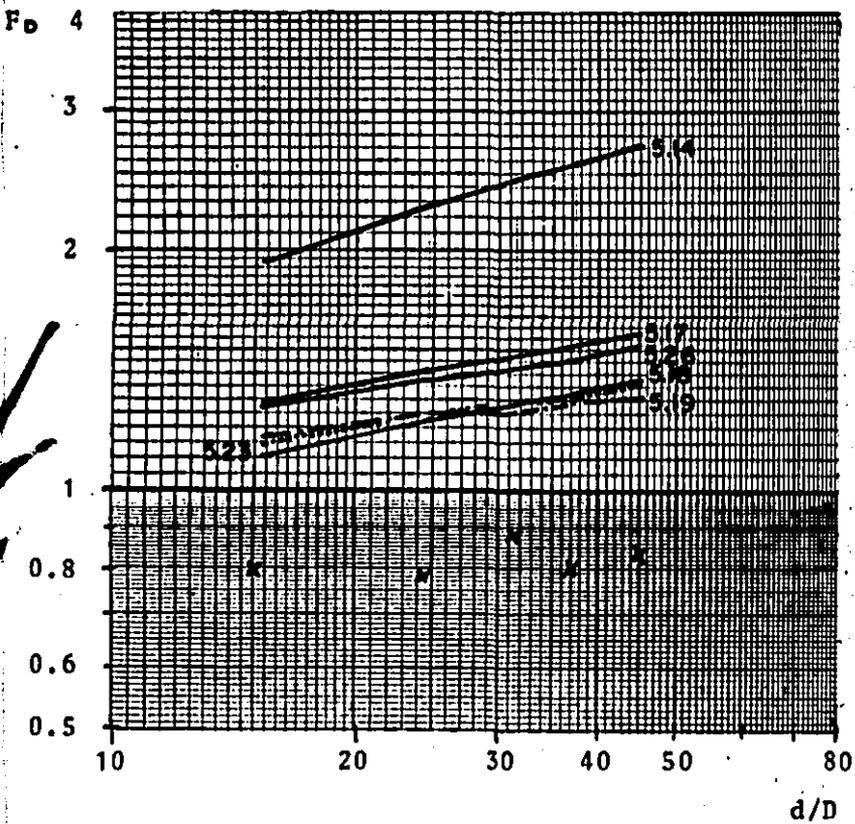


Figura 10i NM114

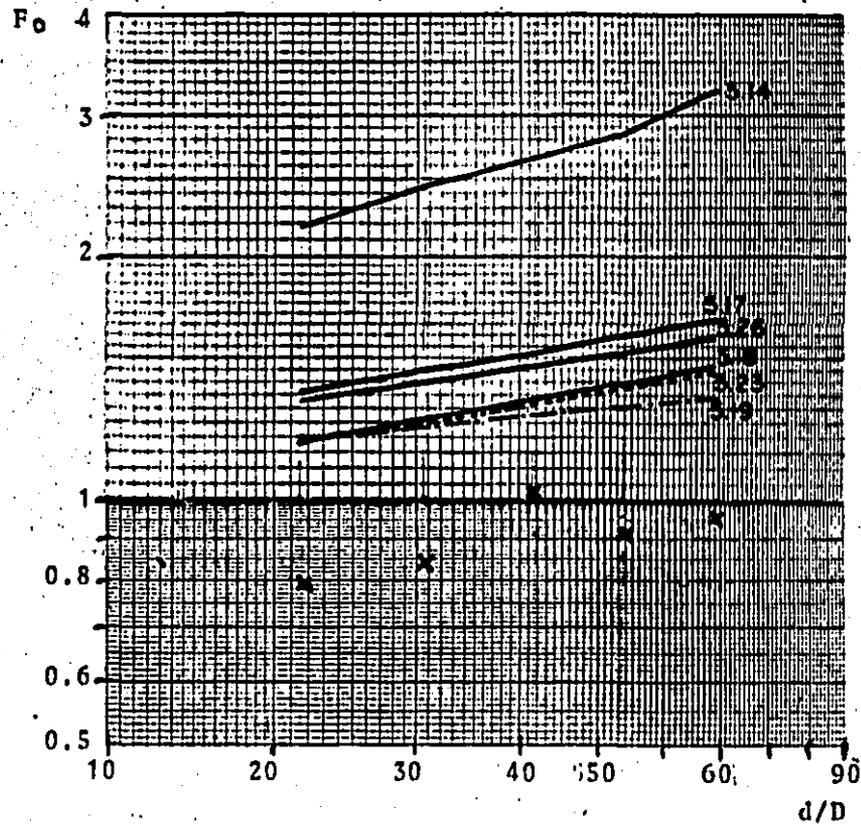


Figura 10j NM16

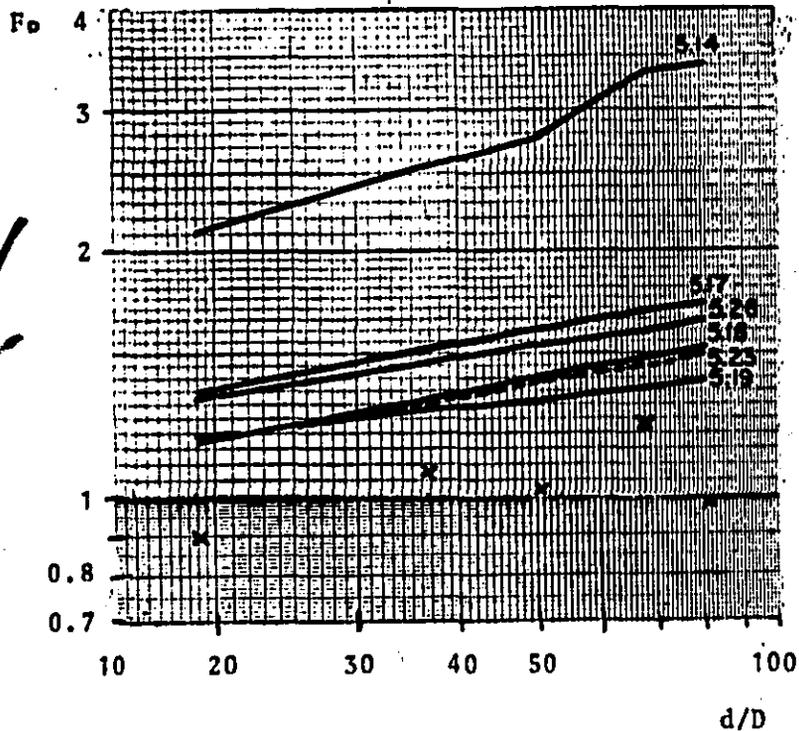


Figura 10k NM25

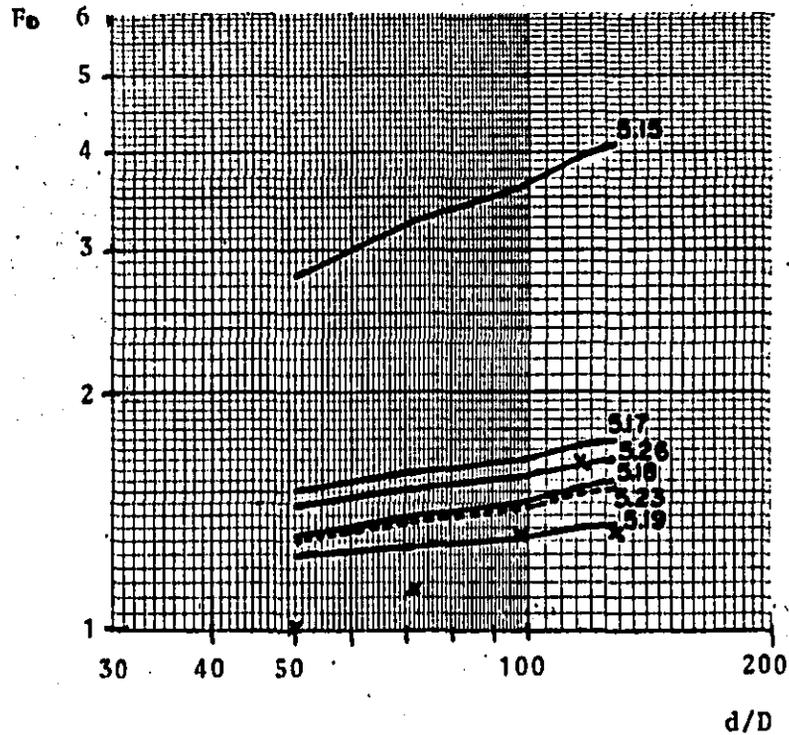


Figura 101 NM30

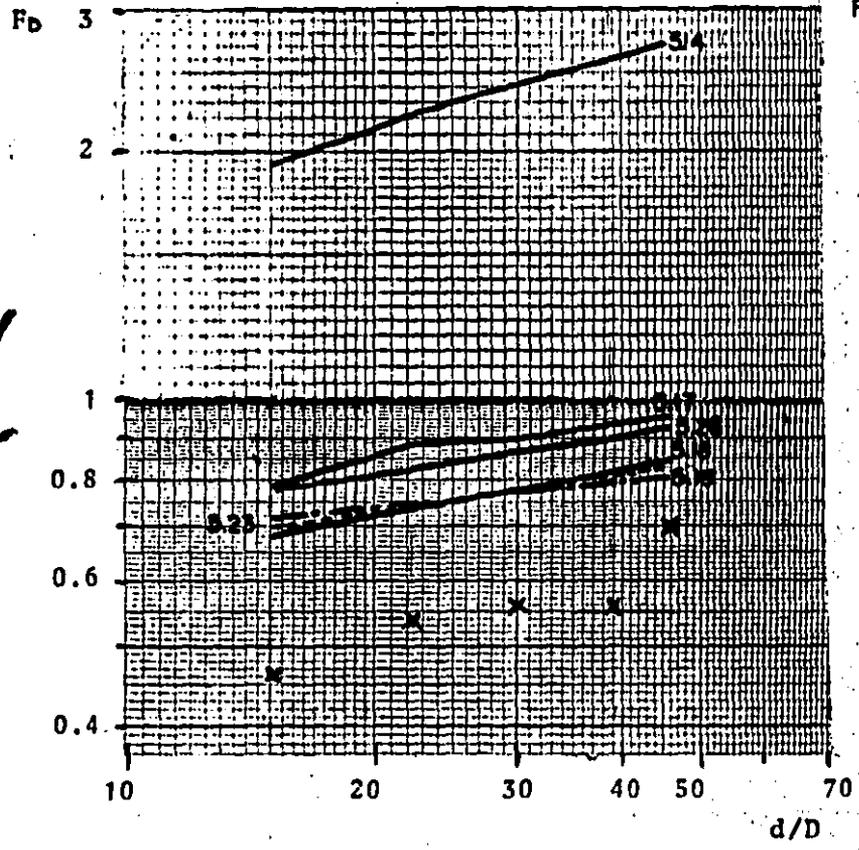


Figura 10m CM14

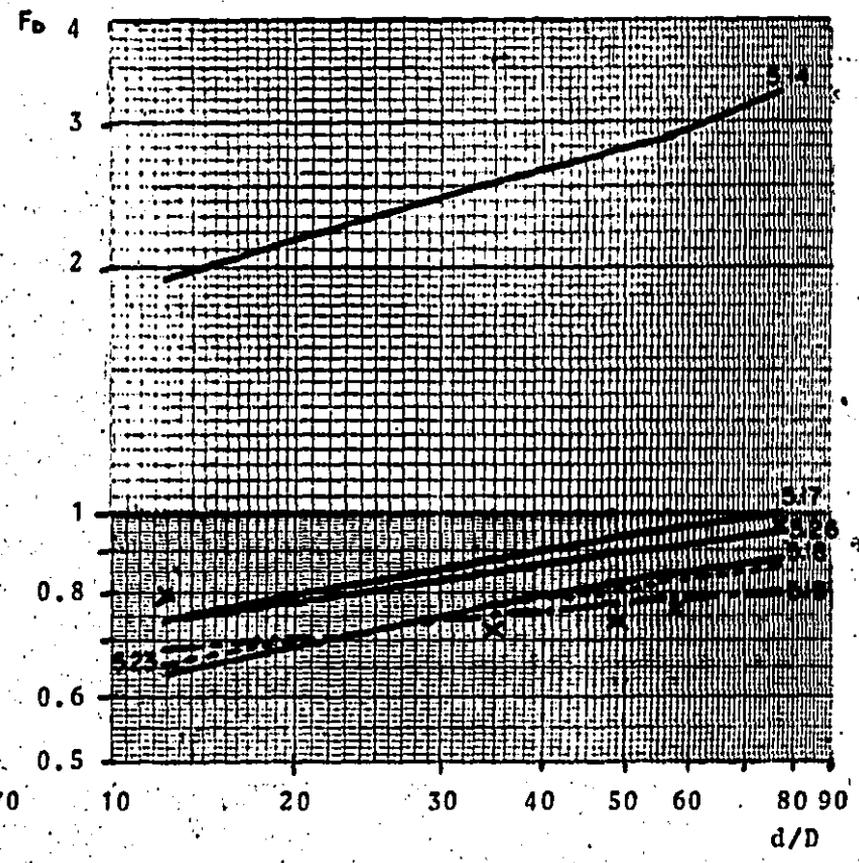


Figura 10n CM16

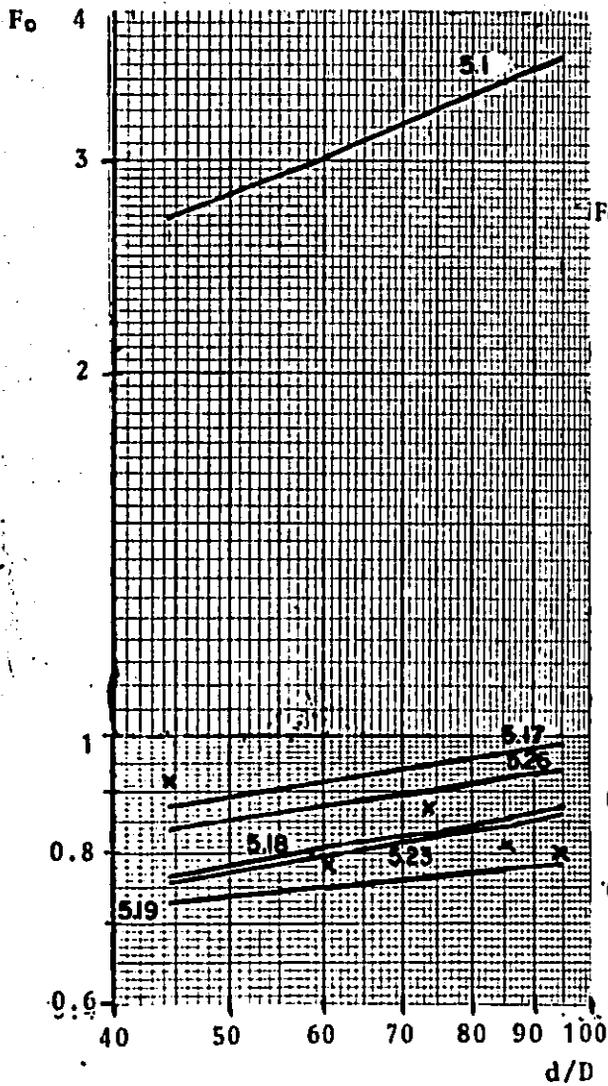


Figura 10o CM25

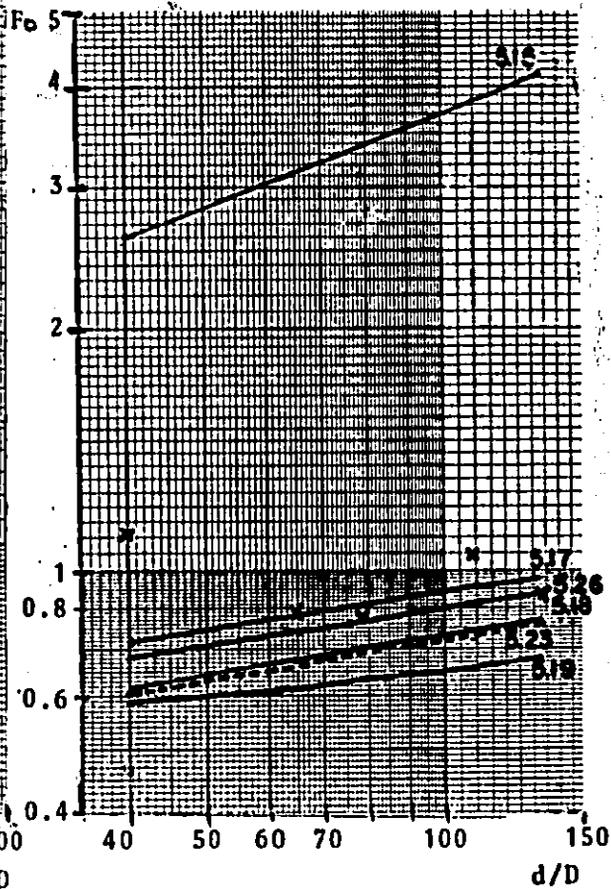


Figura 10p CM30

En las figs 10m a 10p que corresponden al café puede verse un mejor acercamiento de los datos experimentales con las ecuaciones, no obstante no pueda darse una ecuación como la mejor, ya que la posición de los puntos varia según el tamaño del material.

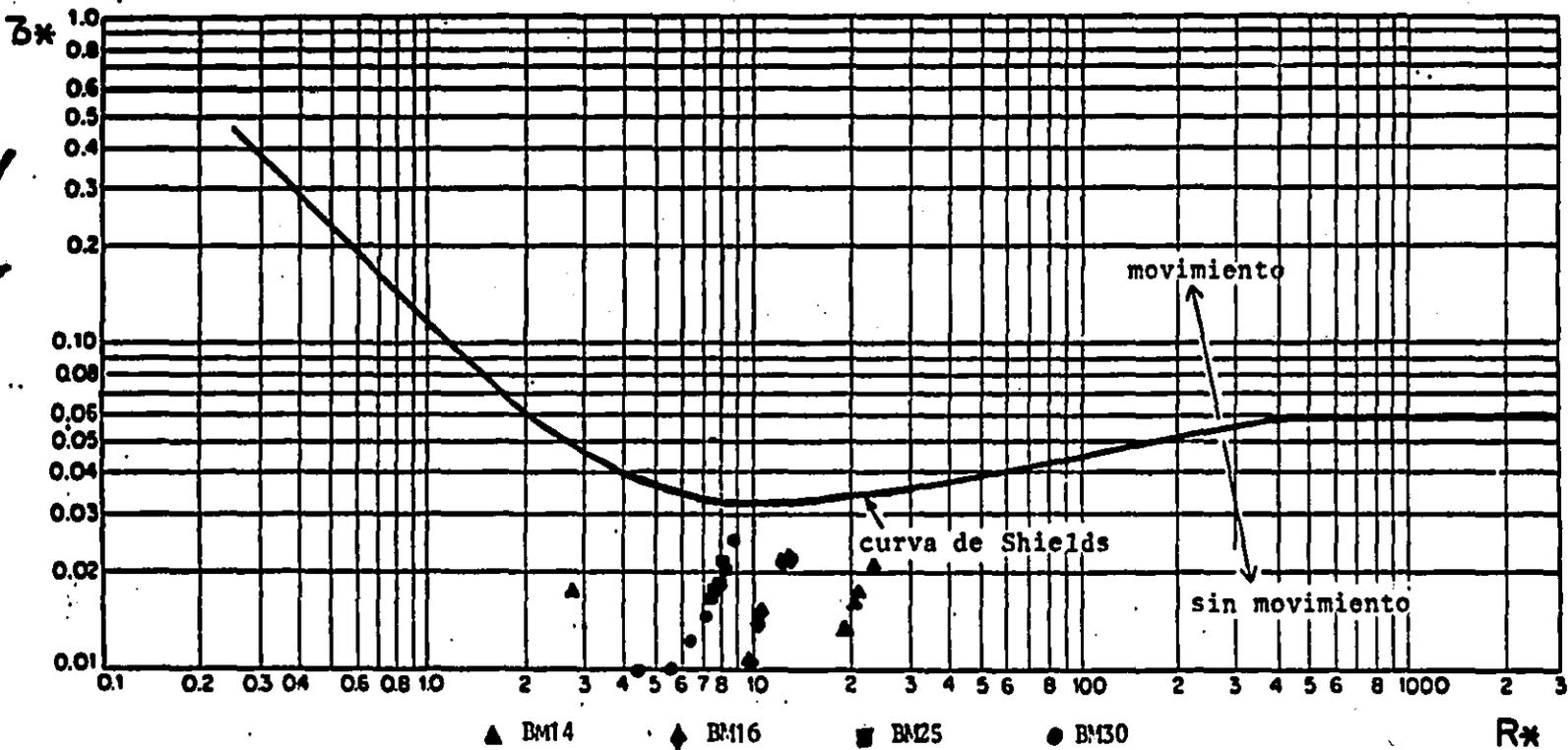
Las discrepancias de los resultados obtenidos en la comparación anterior pueden atribuirse a las diferencias de condiciones en las cuales se dedujeron las ecuaciones y las actuales experiencias. Las ecuaciones surgieron tomando como base estudios y mediciones hechos en campo, mientras que los puntos experimentales se hicieron en un canal prismático. Las diferencias quizá pudieran disminuirse aplicando la corrección de pared (subcap 6.1) a las mediciones ya que se trabajó en un canal estrecho en el cual las paredes tienen influencia sobre el flujo (8 y 9).

5.7.3 Gráfica $R_* - \tau_*$.

En las figuras 5.11a a 5.11d se han graficado los parámetros R_* y τ_* (los datos se tomaron de la fig 5.8, columnas 8 y 9), para los cuatro materiales estudiados; en cada una puede notarse una tendencia a agruparse en relación con el diámetro. Estos resultados son discutidos posteriormente en el cap 6.

En estas gráficas también se ubicó la curva de Shields con objeto de visualizar las diferencias entre ésta y los resultados experimentales. En particular puede decirse que para la arena, tres de los tamaños caen dentro de una zona tolerable con respecto a la

curva de Shields (fig 5.10d). En lo que respecta a los otros materiales se pueden notar diferencias notables; al igual que en el subcapítulo anterior estas diferencias pudieran disminuirse por medio de la corrección de pared.



δ^*

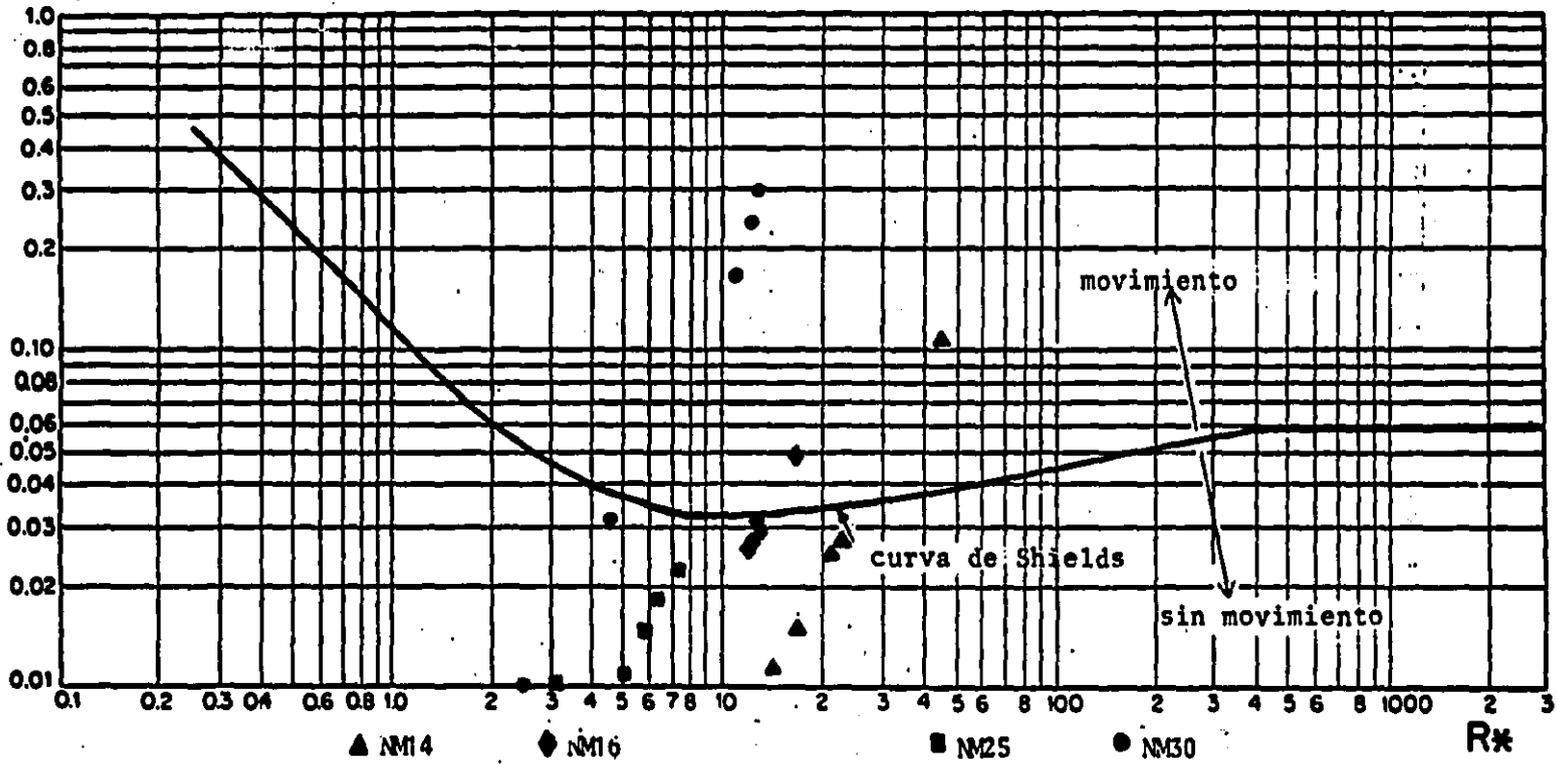


Figura 5.11b Nuez

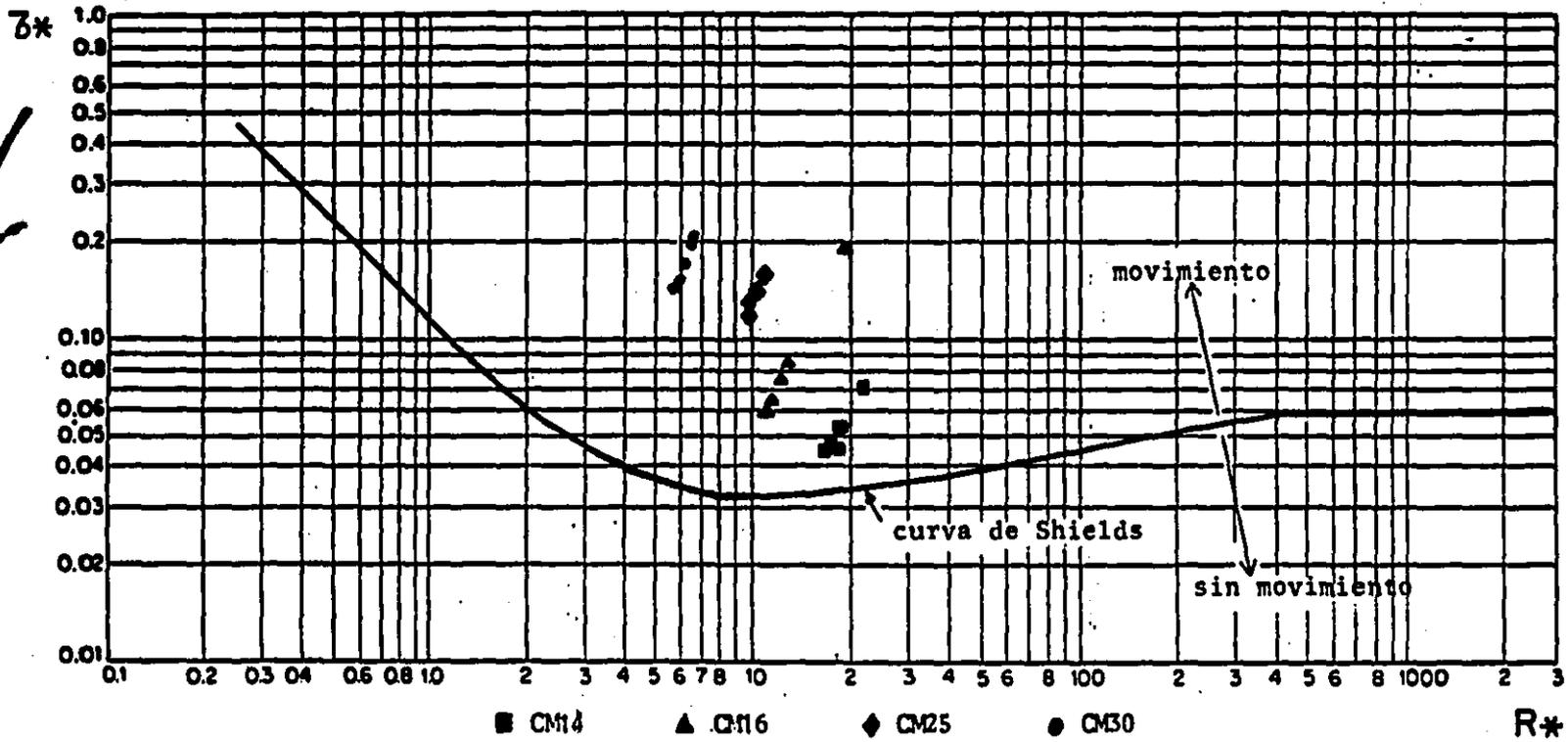


Figura 5.11c Café

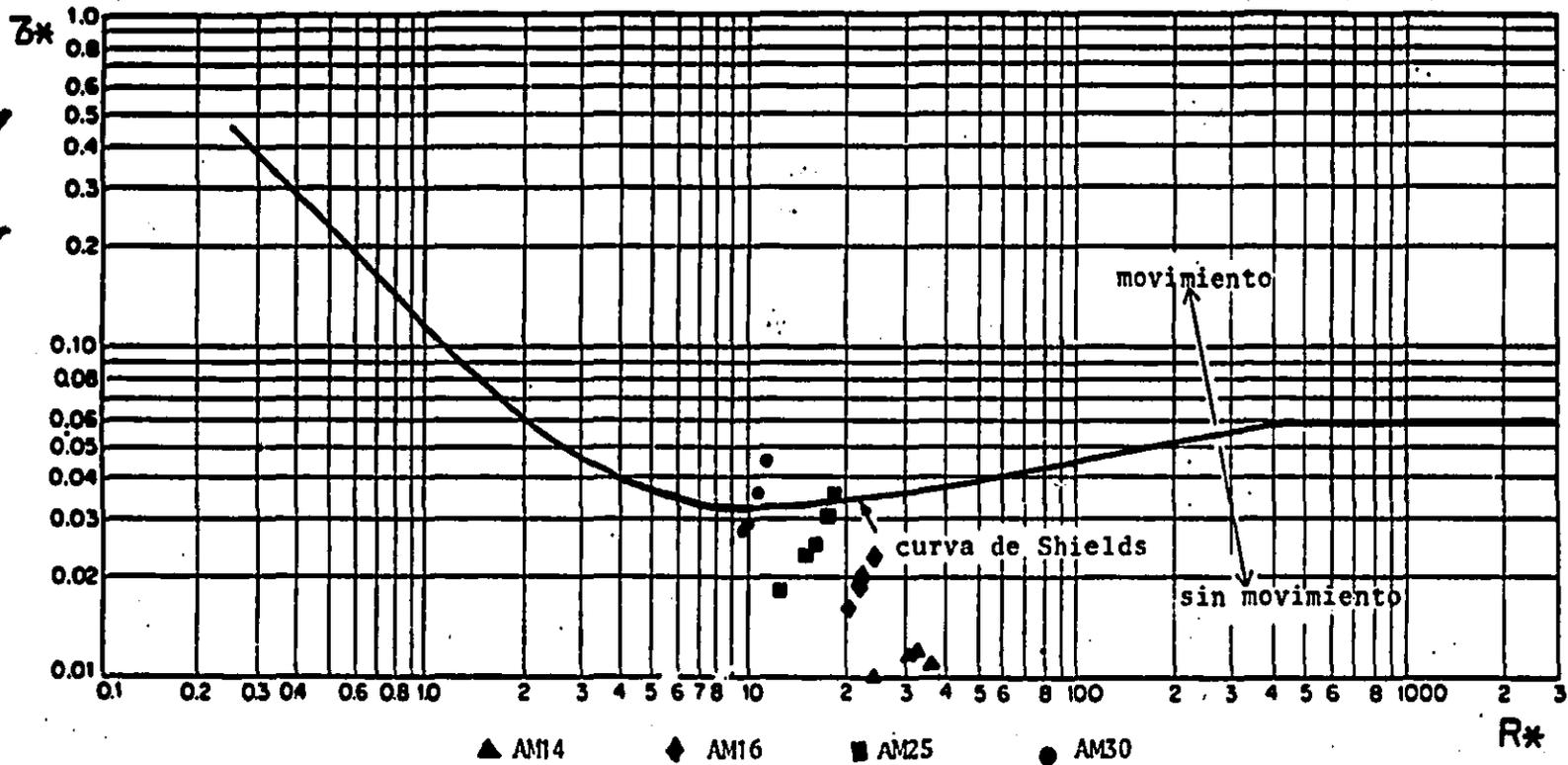
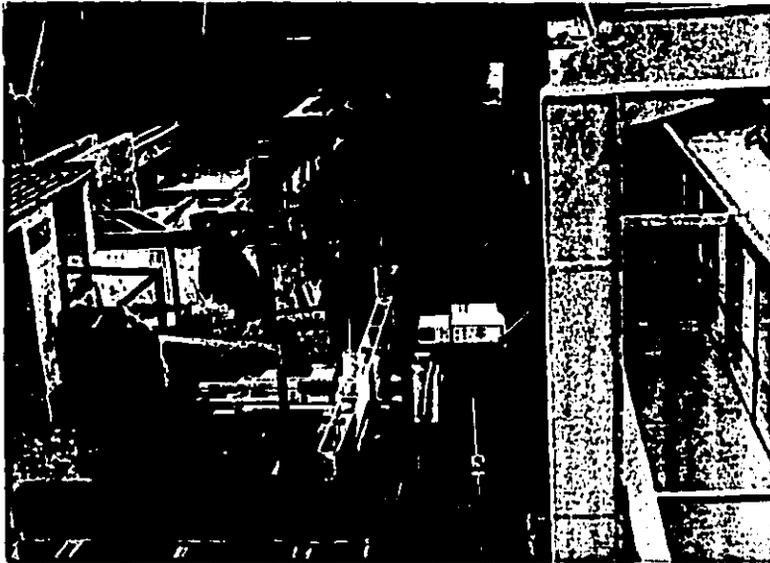


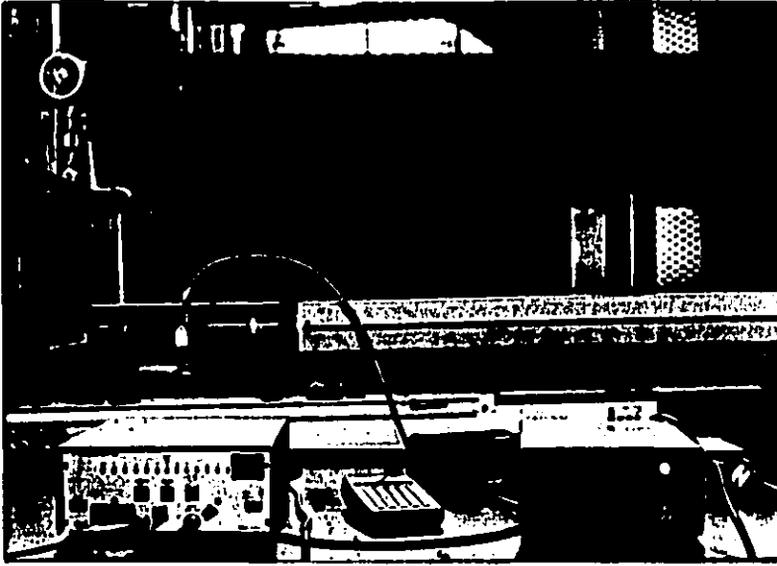
Figura 5.11d Arena.



Fotografía 5.1 Vista de la instalación
y el equipo empleado.



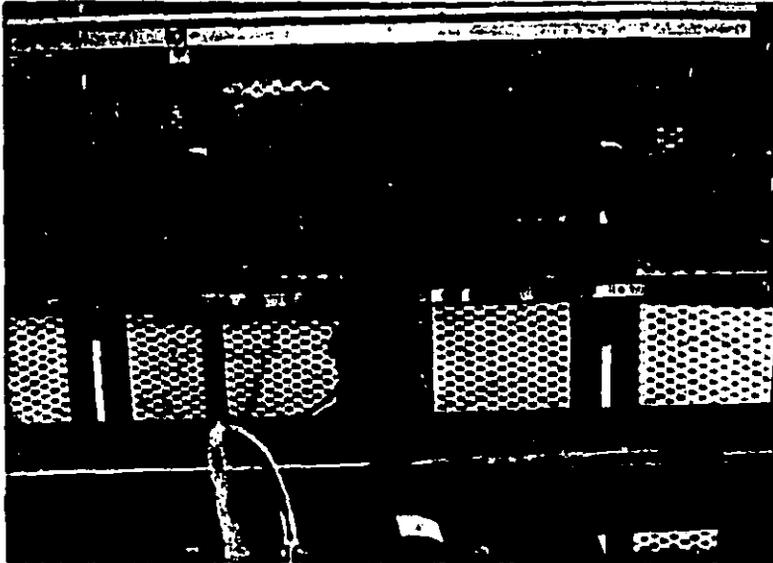
Fotografía 5.2 Vista de la instalación y el
equipo empleado.



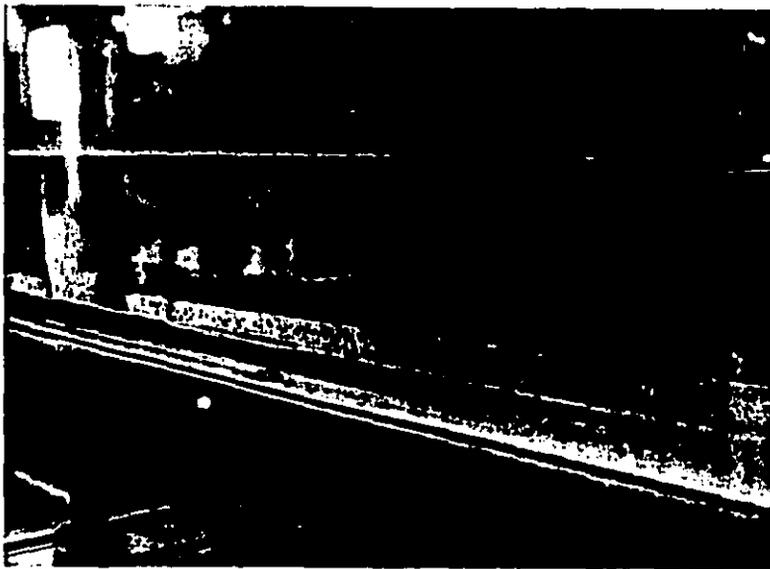
Fotografía 5.3 Alineación del tubo generador del rayo láser.



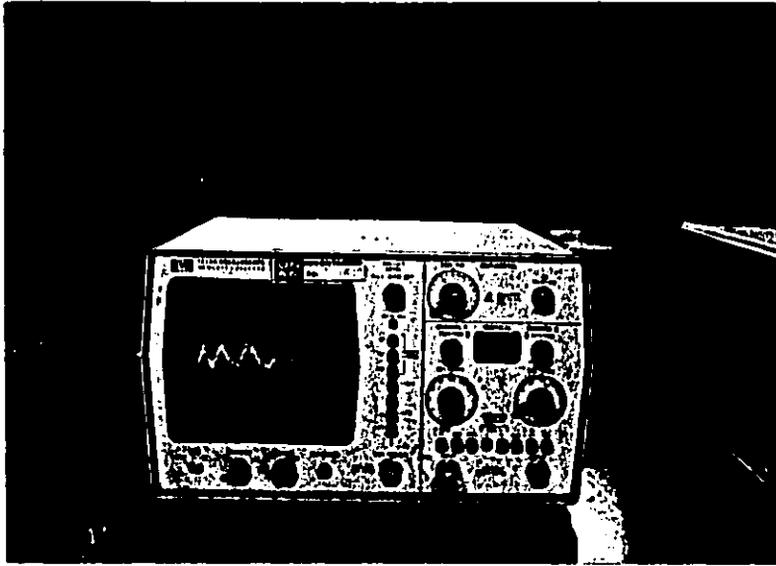
Fotografía 5.4
Vista superior del cruce de los rayos.



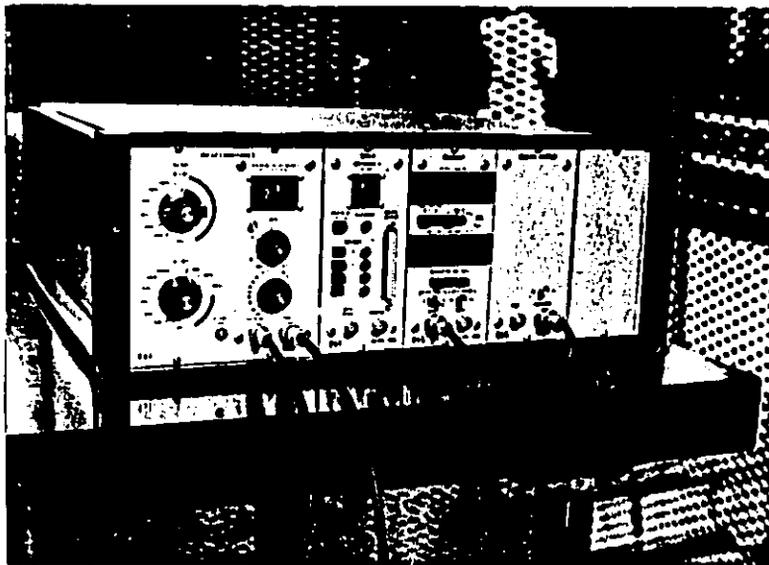
Fotografía 5.5 Vista lateral del cruce de los rayos.



Fotografía 5.6 Posición de las partículas durante un ensayo.



Fotografía 5.7 Señal registrada como la óptima para las mediciones



Fotografía 5.8 Procesador de datos. Pueden verse la velocidad de calibración así como la velocidad para un experimento en un instante cualquiera.

CAPITULO 6 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En el subcap 5.7 se muestran las gráficas de $R^* - r^*$ (figs 5.11) para los cuatro materiales que se emplearon; en ellas puede verse que existe una marcada tendencia de agruparse en relación al diámetro. El objetivo de este capítulo es el de discutir estos resultados así como el de justificar sus deficiencias por medio de un análisis teórico.

6.1 Corrección de pared

Cuando se realizan experimentos en canales estrechos de laboratorio y los resultados que se obtienen se quieren extrapolar a otros más anchos o a cauces naturales es necesario eliminar la influencia que las paredes ejercen sobre la hidrodinámica del flujo. En los canales de laboratorio las paredes suelen estar

hechas de vidrio, de lucita o bien mortero de buen acabado y el fondo de otro material; acero, madera etc. En los cauces naturales el material de las paredes es similar al del lecho.

Lo anterior se ve reflejado directamente en el radio hidráulico. En los canales experimentales el tirante es del mismo orden de magnitud que el ancho y a veces resulta menor (como en estecaso). Esta situación no ocurre en los cauces naturales, por el contrario en los canales muy anchos el tirante llega a confundirse con el radio hidráulico. Por tanto para disminuir estos efectos se recomienda utilizar la corrección de pared a los resultados experimentales.

Para ello en este trabajo se ha elegido el método propuesto por Maza-García ([8] y [9]), el cual consiste básicamente en lo siguiente

Se divide el radio hidráulico en dos partes

$$R_h = R_w + R_b \quad (6.1)$$

en donde R_w es el radio hidráulico de las paredes y R_b el que concierne al fondo. El método consiste en considerar solo R_b ; por tanto se puede escribir

$$R_b = \frac{A_b}{P} = \frac{A - A_w}{P} \quad (6.2)$$

donde P es el perímetro mojado total y A_w es el área que se asocia a la pared, definida por

$$A_w = \frac{Bw}{2} \left[\frac{2d}{B} - \ln \left(1 + \frac{2d}{B} \right) \right] \quad (6.3)$$

en la que B es el ancho del canal. Al sustituir la ec 6.3 en 6.1 se obtiene

$$R_b = \frac{d}{Z} - \frac{B}{2Z} \left[Z - 1 - \ln Z \right] \quad (6.4a)$$

con Z definida como

$$Z = 1 + 2d/B \quad (6.4b)$$

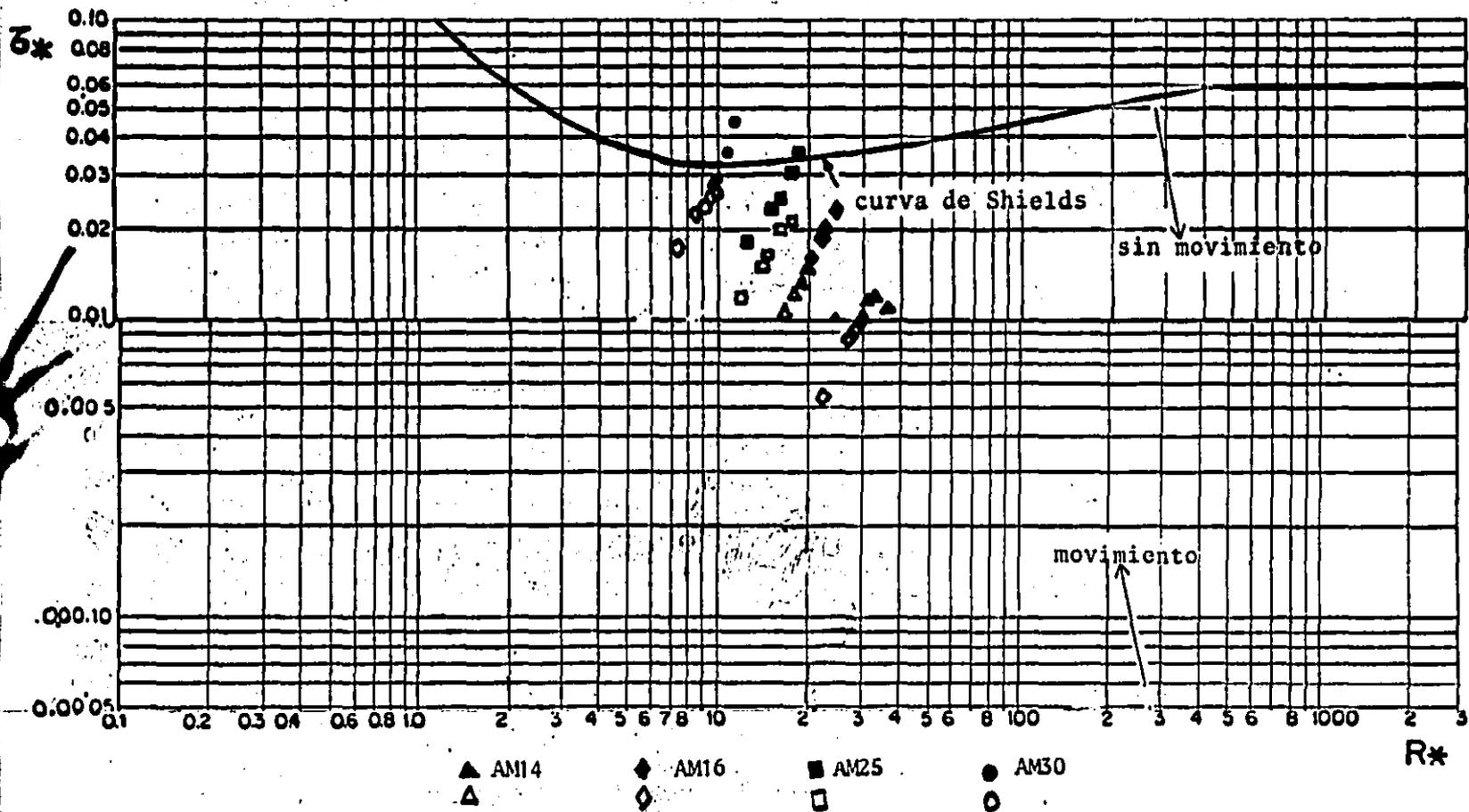
Expresión que es independiente del tipo de rugosidad de las paredes y del fondo. Con esto las mediciones de un canal experimental deben de ser similares a las que se tendrían en un canal muy ancho. De aquí en adelante se considerará

$$R = R_b \quad (6.5)$$

Este concepto se ha aplicado a los resultados experimentales, concretamente a los parámetros R^* y τ^* (Tabla 6.1); en las figs 6.1 se encuentran graficados ambos parámetros con y sin corrección

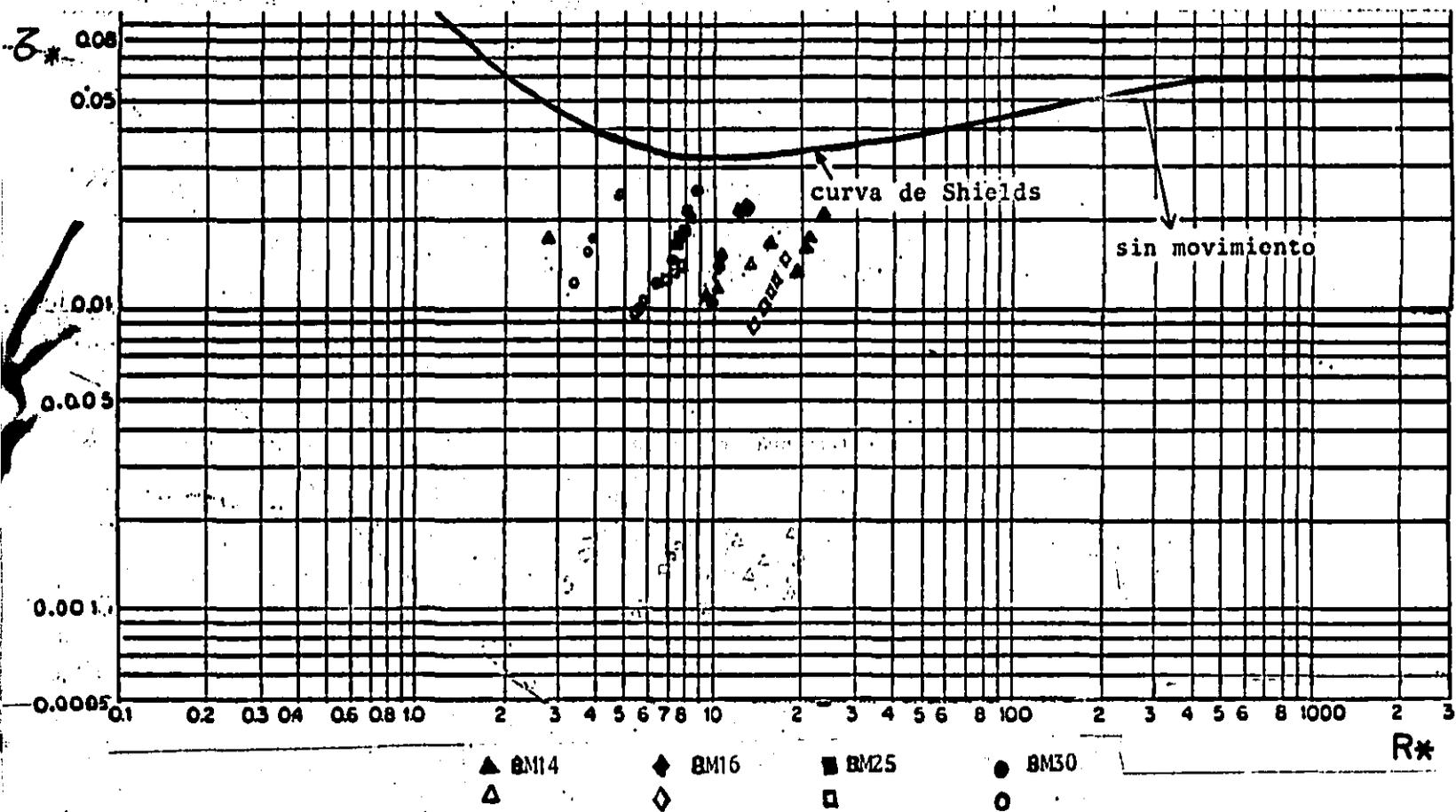
Arena		Nuez		Baquelita		Café	
R*	\bar{z}^*	R*	\bar{z}^*	R*	\bar{z}^*	R*	\bar{z}^*
27.83827	0.009885	16.54367	0.014939	16.73487	0.010650	22.19671	0.065241
20.23607	0.005223	17.80385	0.017301	17.37775	0.011484	25.10071	0.096879
26.76649	0.009138	36.51254	0.072768	18.97225	0.013688	21.45497	0.070780
7.279904	0.000676	14.55265	0.011559	17.19113	0.011238	19.44189	0.058121
26.89331	0.009225	13.39738	0.009797	15.80872	0.009503	19.39713	0.056507
19.05242	0.014043	12.65321	0.028254	14.1590	0.009323	23.78730	0.280196
18.10182	0.012677	9.762110	0.016817	9.987326	0.011850	16.24468	0.118209
17.33546	0.011626	11.07393	0.021641	9.473227	0.010661	13.91539	0.086740
19.40028	0.014560	10.66455	0.020070	10.79663	0.013648	14.71305	0.096969
4.983005	0.000960	11.50542	0.023360	10.31201	0.012633	12.47957	0.069763
14.52583	0.020773	0.476999	0.012458	5.842449	0.010850	11.66225	0.180221
14.06597	0.019478	0.946806	0.049084	5.810875	0.010733	12.89997	0.246375
13.18272	0.017109	1.220778	0.081600	7.024152	0.015682	11.90613	0.209875
14.43127	0.020503	0.879811	0.042383	6.646959	0.014043	11.26257	0.187800
12.32705	0.014960	1.183943	0.076750	7.305426	0.016964	10.95261	0.177605
9.385430	0.026815	3.938283	0.024182	3.770488	0.014108	7.677003	0.287216
7.794594	0.018495	2.222565	0.007701	3.395936	0.011444	7.659334	0.285896
8.990596	0.024607	10.19850	0.162164	3.919285	0.015243	6.930469	0.234073
8.678490	0.022928	8.313351	0.107754	4.863331	0.023471	6.663054	0.205714
8.715994	0.023126	10.59223	0.174927	2.310267	0.005296	6.284995	0.187912

Tabla 6.1 Valores de R* y \bar{z}^* con corrección de pared.



Puntos llenos = puntos experimentales
 Puntos vacios = correccion de pared

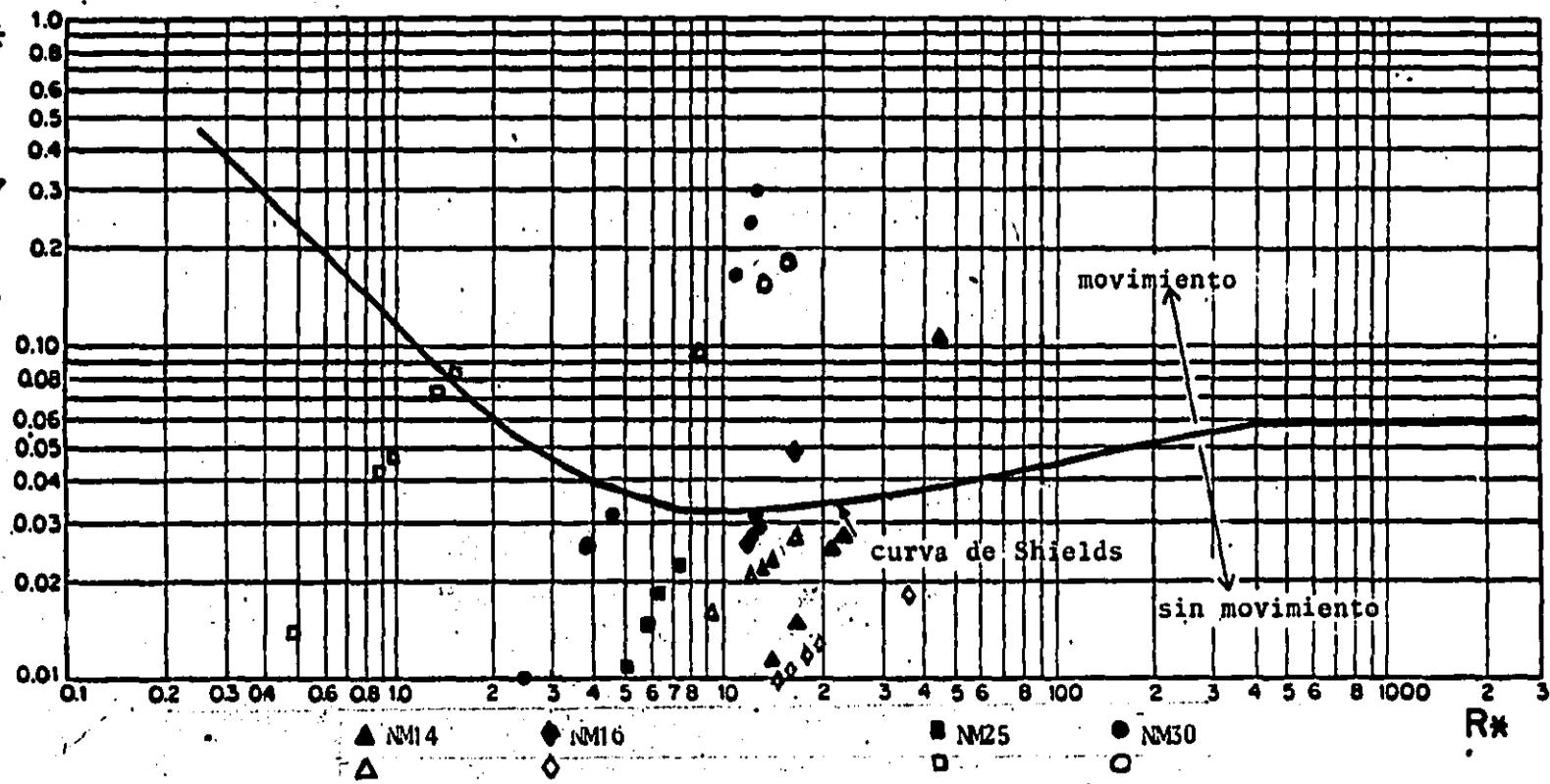
Figura 6.1a Arena



Puntos llenos = Puntos experimentales.
 Puntos vacios = corrección de pared.

Figura 6.1b Baquelita.

δ^*

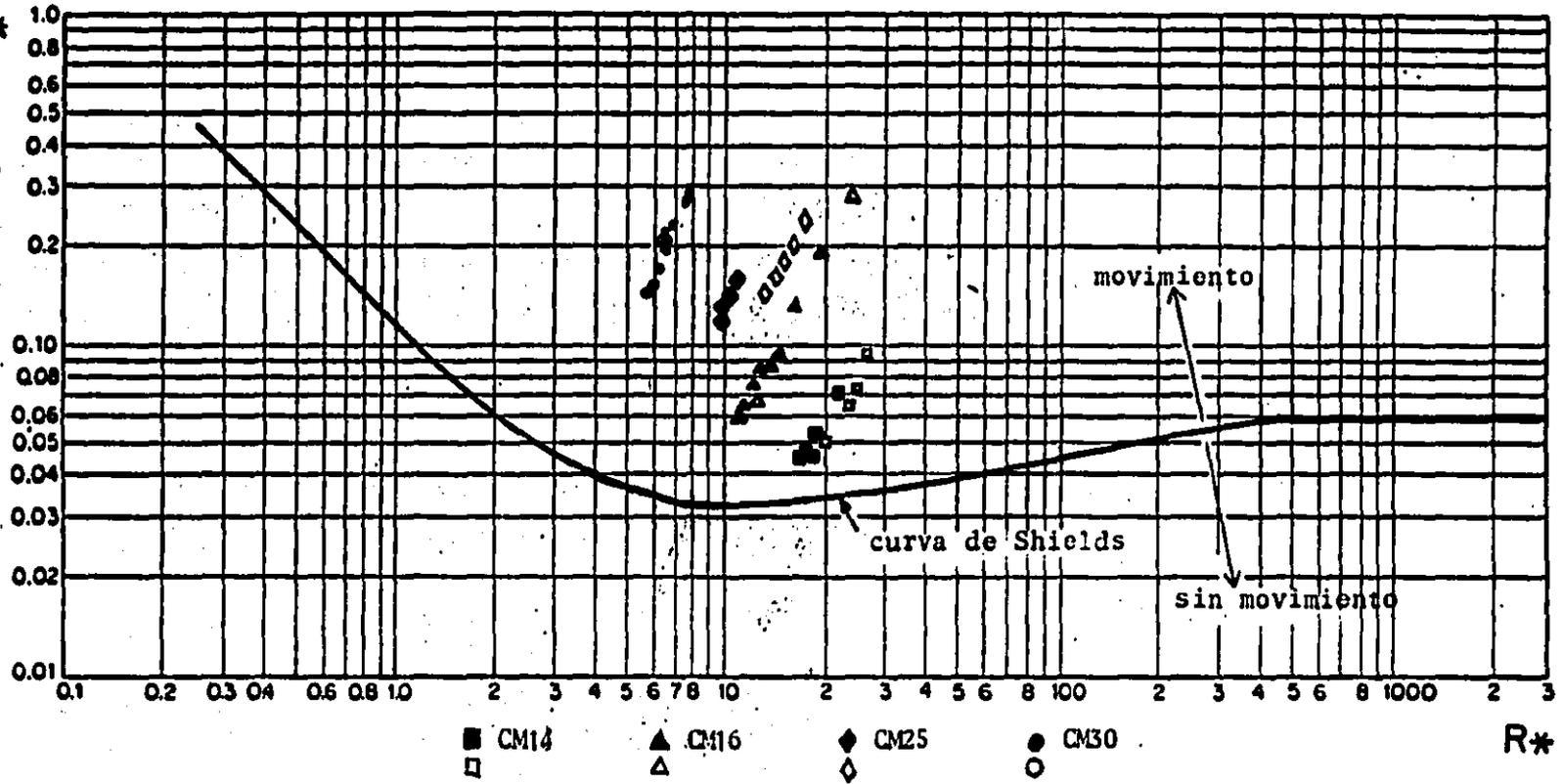


▲ NM14 ◆ NM16 ■ NM25 ● NM30
△ ◇ □ ○

Puntos llenos = Puntos experimentales.
Puntos vacios = Corrección de pared.

Figura 6.1c nuez

δ^*



Puntos llenos = Puntos experimentales
Puntos vacios = Corección de pared.

Figura 6.1d Caf6

de pared, esto se hizo con el objeto de visualizar mejor la comparación. En los puntos con corrección de pared puede observarse mejor aun la tendencia a agruparse en líneas definidas por los diferentes tamaños de material.

6.2 Gráfica $R^*-\tau^*$

De aquí en adelante sólo se trabajará con los números a los cuales se les ha aplicado la corrección de pared. En la fig 6.2 se encuentran graficados todos los puntos $R^*-\tau^*$ que se obtuvieron de las mediciones para los cuatro materiales estudiados. Puede verse que ellos se ajustan a rectas de la forma

$$\tau^* = aR^{*b} \quad (6.6)$$

en las cuales b representa la pendiente y a la ordenada al origen.

6.3 gráfica $R^*-\tau^*-D^*$

Dada la forma en que se representan las rectas de la figura 6.2 existe un tercer parámetro que de alguna forma las liga. Después de un análisis se encontró que la relación siguiente

$$D^* = \frac{\Delta g D^3}{\mu^2} \quad (6.7)$$

es aproximadamente constante para cada tamaño de material. En la

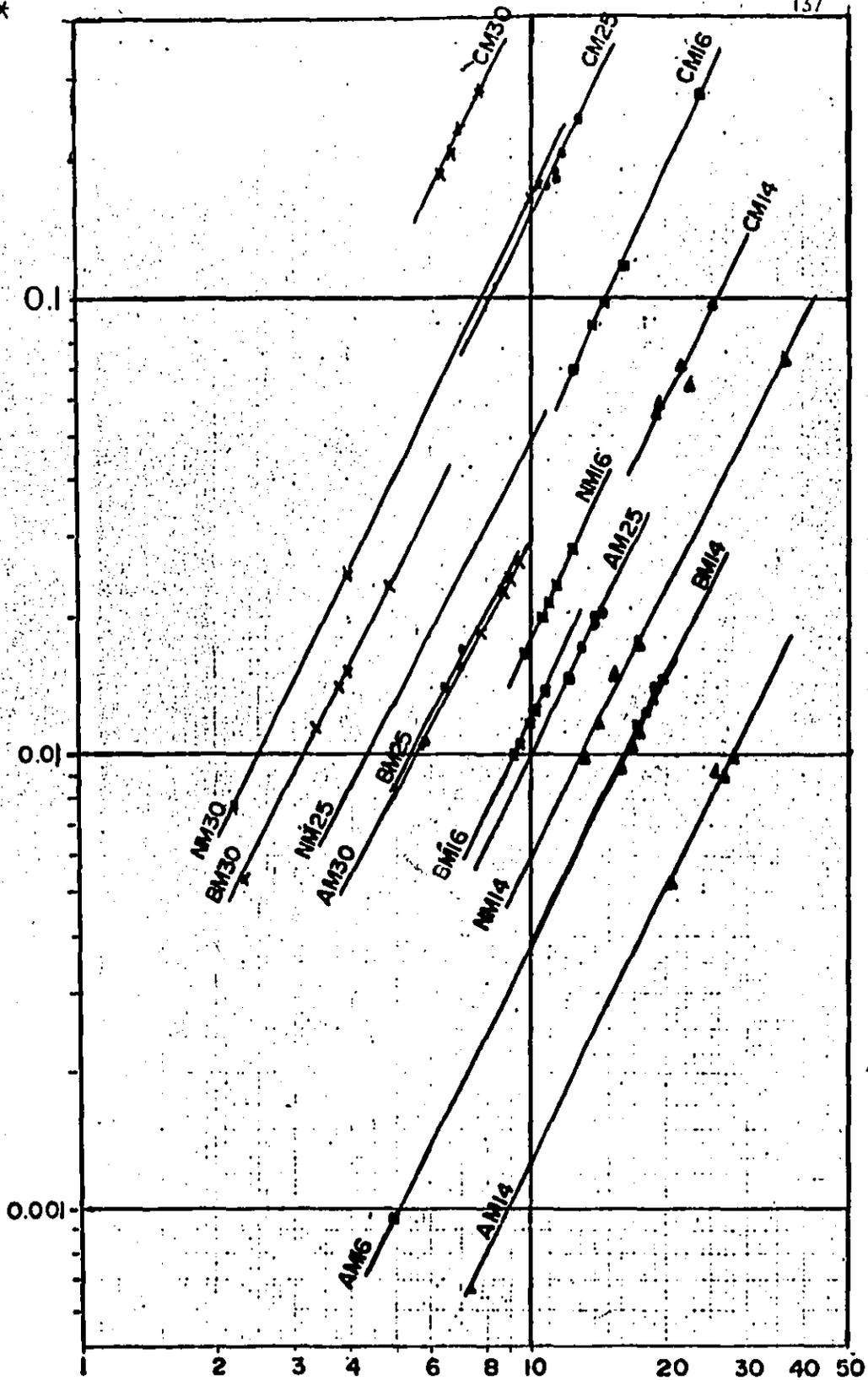


Figura 6.2

Rx

figura 6.3 se anota este parámetro y puede verse la estrecha relación que guarda con respecto a los otros dos.

6.4 La ley de defecto de velocidad

Los resultados que se obtuvieron con los parámetros R^* y τ^* aún con la corrección de pared muestran diferencias al compararseles con la curva de Shields. Con objeto de discutir tales diferencias se presenta un análisis basado en la ley de defecto de velocidad (6), el cual es aplicable para la parte exterior de la capa límite y es válida tanto para paredes lisas como para rugosas. En la figura 6.4 pueden verse los seguimientos de esta ley dada por los parámetros y/δ y $(U-\bar{u})/V_*$; con δ como el espesor de la capa límite, y un valor puntual del tirante dentro de la capa límite, U la velocidad fuera de la capa límite y \bar{u} el valor de la velocidad correspondiente a cada y .

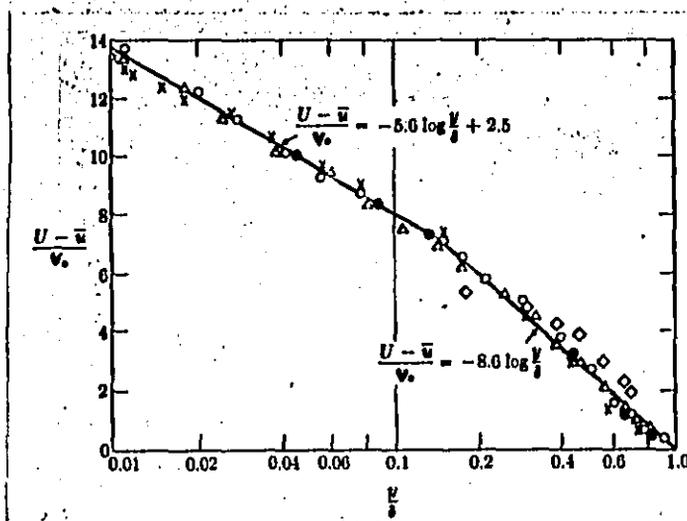


Fig. 6.4 Ley del defecto de la velocidad.

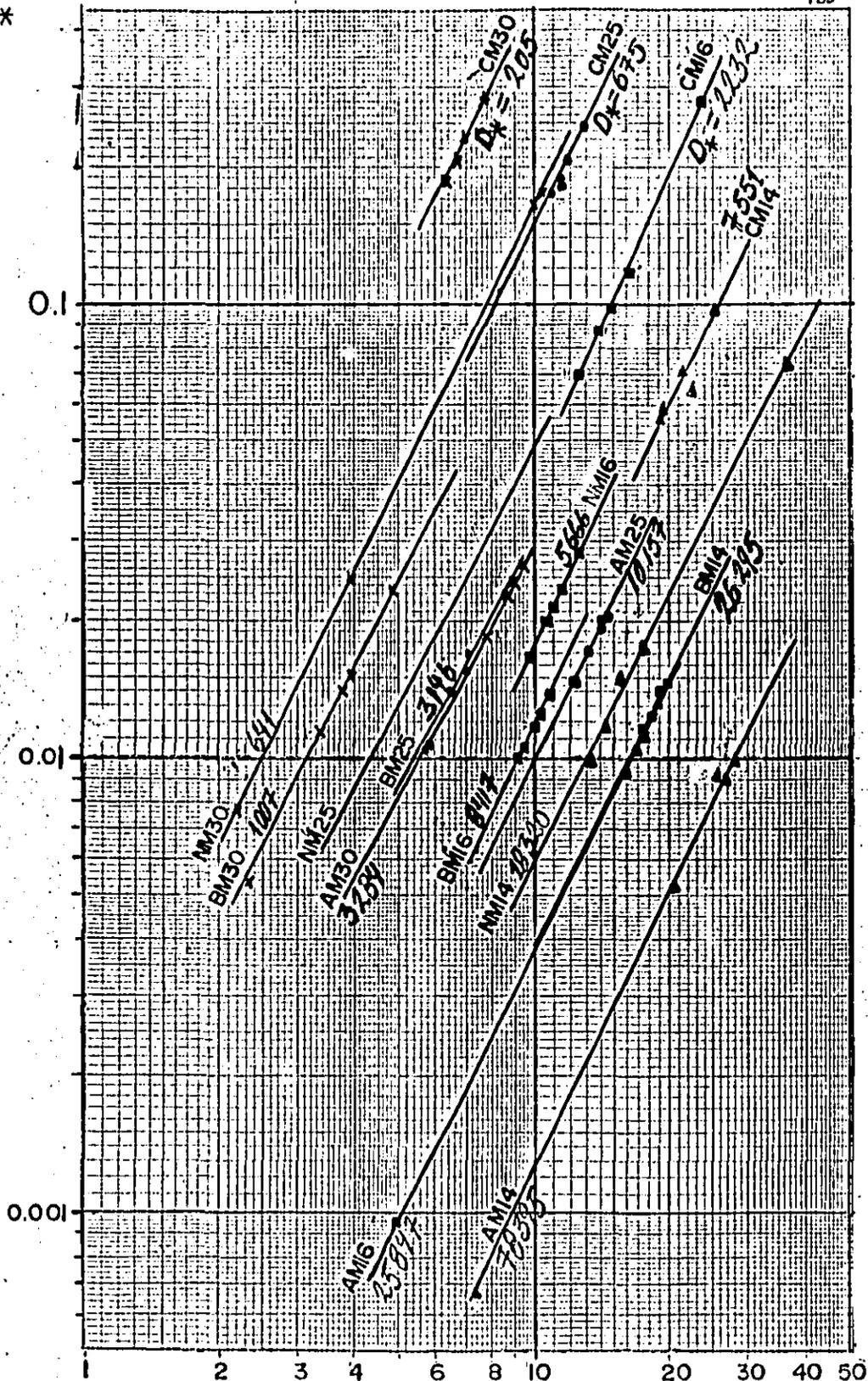


Figura 6.3 Rectas R^x-Z^* , con el parámetro D^* interno.

R^x

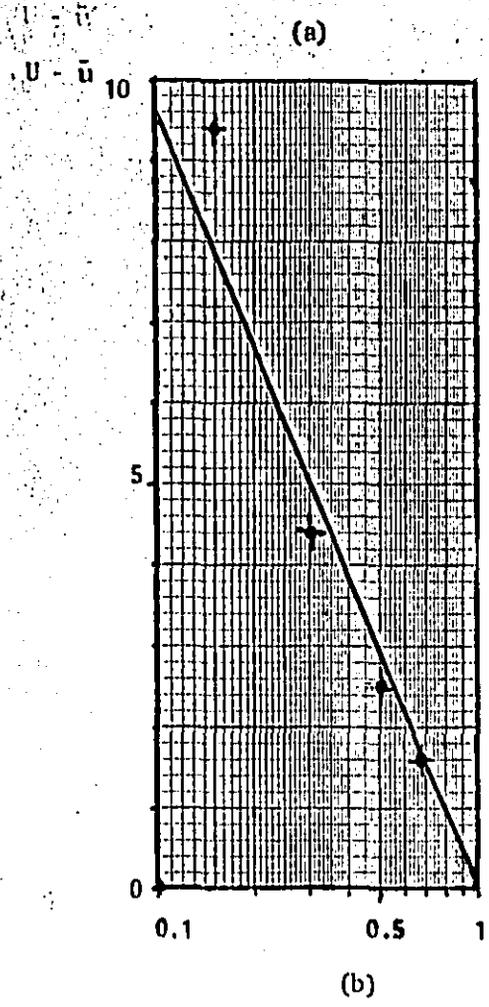
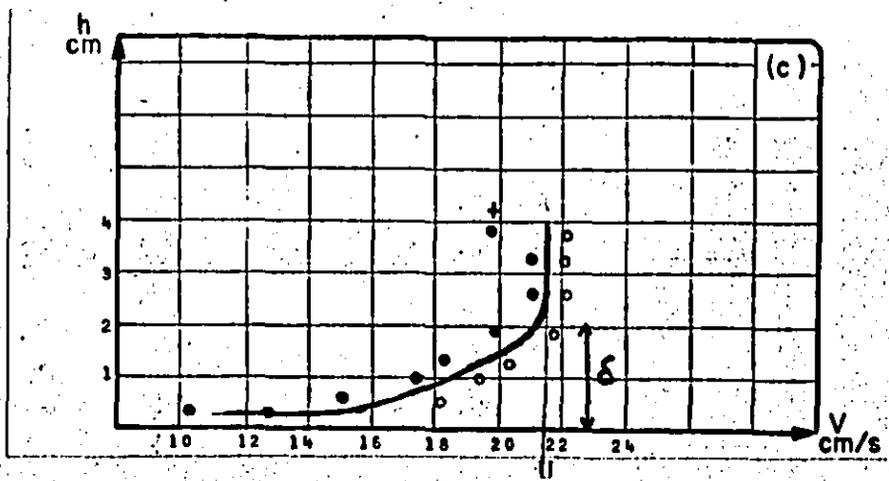


Figura 6.5 Obtención de la pendiente C

Para aplicar este método a los datos se llevó la siguiente metodología

1. Para los perfiles de velocidad medidos, del tipo de los que se ilustran en la fig. 5.6, se determinó el espesor δ y la velocidad U (fig. 6.5a)

2. De las hojas de registro de datos de la figura 5.5 se leían los valores de y que cayeran dentro de la zona delimitada por δ ; para cada y se leía su correspondiente \bar{u} .

3. Se obtuvieron las relaciones y/δ y $U-\bar{u}$ y se graficaron (fig. 6.5b); posteriormente se obtenía la pendiente C de la recta.

4. Al igualar las gráficas 6.4 y 6.5b se deducía que

$$V_* = C/(-8.6)$$

se aclara que siempre se procuró trabajar en la región de $y/\delta < 0.15$

5. Con V_* se obtenían finalmente los parámetros τ^* y R^* .

Los resultados obtenidos para los cuatro tamaños de arena se indican en la figura 6.6, en la que también se han graficado los valores de dichos parámetros con corrección de pared así como los resultados obtenidos con el método de defecto de velocidad para la NM14. Este último se anexa por ser el más lajeado de los

materiales con que se contaba y poder determinar con ello un efecto de forma con respecto a lo obtenido para la arena.

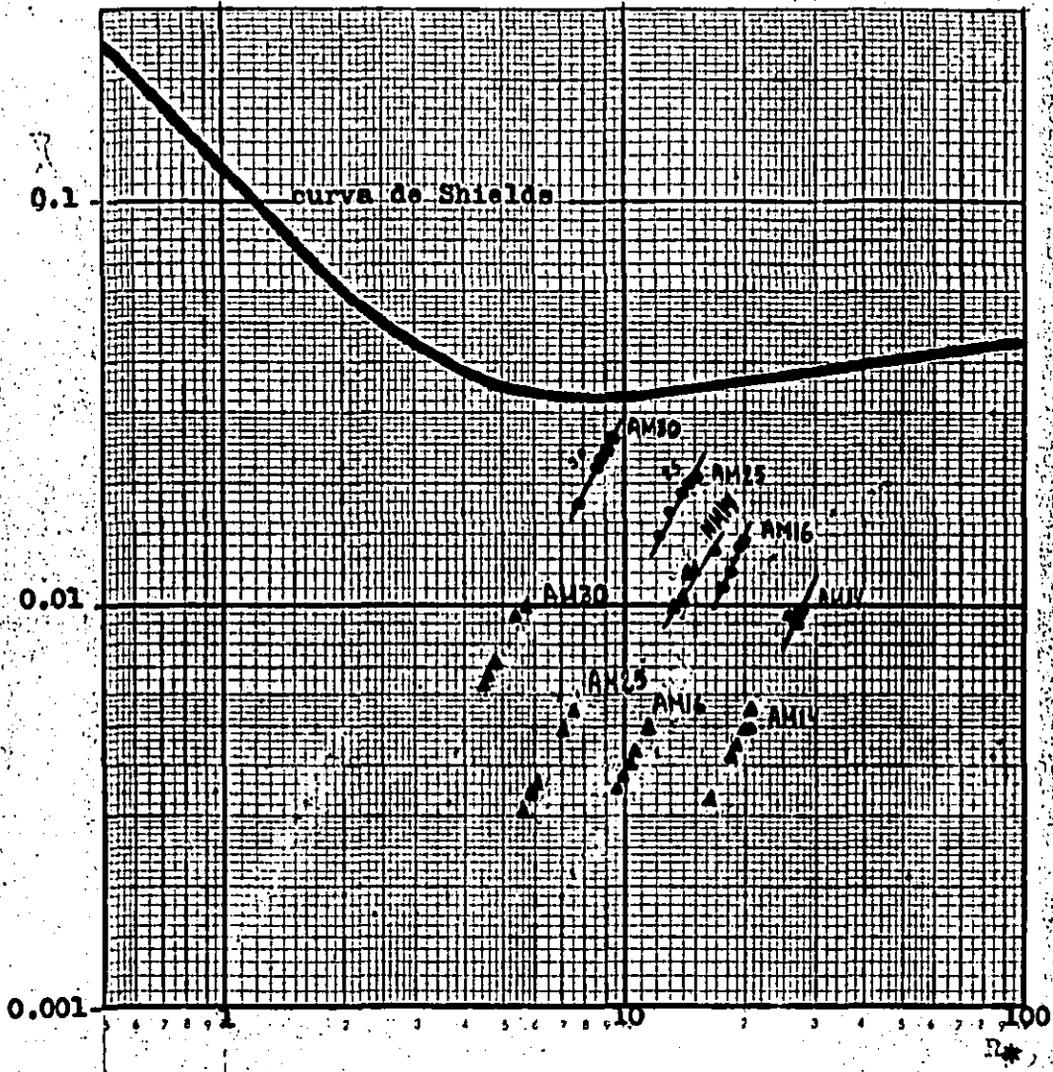
Los resultados de las figs 6.1 y 6.6 muestran una ligera tendencia a agruparse siguiendo un orden con respecto al diagrama de Shields. No obstante existe una dispersión de los puntos, misma que se atribuye a algunas consideraciones que se tomaron durante el desarrollo del trabajo; estas se pueden agrupar en tres formas diferentes como se indica a continuación

A. De tipo experimental

- La obtención de las propiedades de los materiales por un método de laboratorio (inciso 4.3.5).
- El criterio tomado para identificar el inicio del movimiento (inciso 5.4.4)
- El carácter del experimento, es decir un canal con fondo fijo, partículas aisladas y flujo no uniforme.
- Los errores obtenidos en las lecturas de las mediciones durante la etapa experimental.

B. En el manejo de los datos

- La forma de determinar tanto la velocidad media como la del fondo (inciso 5.5.1).



• Corrección de pared
 ▲ Ley de defecto de velocidad

Figura 6.6

- El cálculo de la pendiente por medio de las lecturas de los limnómetros.

C. Otras consideraciones.

- No se tomó en cuenta el desarrollo de la capa límite y su posible influencia en las mediciones.

- Debido a que se probaron diferentes formas y densidades del material, hizo falta deducir un parámetro que tomara en cuenta estos factores.

CAPITULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Dada la gran cantidad de variables que intervienen en el transporte de sedimentos es innegable la ayuda que ofrecen las técnicas experimentales para buscar un conocimiento más profundo de dicho fenómeno.

En el caso del inicio de movimiento, o condición crítica, existen muchos aspectos que difícilmente logran tomarse en cuenta en una formulación analítica. De aquí, que casi en su mayoría los criterios existentes estén fundamentados sobre bases experimentales.

Por ello es importante cuidar o realizar el proceso de la experimentación, ya que de ésta etapa depende que lo obtenido pueda ser de importancia. Como ya se mencionó, actualmente existen

muchos estándares, pero nunca un problema será igual a otro. En cada uno de ellos se exige de una apreciación o de un objetivo y el enfoque que se le dé dependerá de quien realice la experimentación. Prueba de ello son las consideraciones tomadas en cuenta en este trabajo para la evaluación de las densidades por medio de un método de laboratorio (subcap 4.2) o el criterio para determinar la condición del inicio de movimiento (inciso 5.4.4).

En lo que respecta a los criterios de velocidades críticas siempre será preferible utilizar aquellos que incluyan la mayor parte de las variables que intervienen; ya que, por ejemplo algunas ecuaciones que se han analizado y que excluyen el parámetro Δ , hacen que al incluirles otras densidades distintas a aquellas que les dieron origen, arrojen resultados por demás ilógicos (ver por ejemplo las figuras 5.10e a 5.10p). En lo que respecta a las velocidades, siempre será más conveniente tomar las medias debido a que involucra menos trabajo en su evaluación; esto puede ser de mucha utilidad mientras se esté en campo y se desee conocer rápidamente las condiciones críticas de movimiento.

Es recomendable que al utilizar cualquiera de los criterios de velocidades discutidos en la sección 5.7, para conocer las condiciones críticas de las partículas, éstas se comparen con algunas mediciones reales ya que, pueda suceder, que una ecuación casi se ajuste a dichas mediciones y que mediante una rápida comparación la ecuación pueda modificarse para obtener resultados más precisos y más aún, al hacer dicha modificación, la ecuación tenga más validez y puedan probarse entonces diferentes condiciones con mayor seguridad para ese caso en particular.

Esto se hace evidente dado el comportamiento aleatorio de los ríos naturales, lo cual provoca que éstos varíen su cauce en el tiempo y a lo largo de su longitud.

Por otra parte, en las gráficas de $R_* - r_*$ analizadas en el subcapítulo 5.7.3, puede verse la importancia del diámetro (o la magnitud D) dentro de dichos parámetros, ya que para los diferentes materiales estudiados existe una tendencia a agruparse conforme a dicha magnitud. Tendencia que resultó más uniforme, aún cuando a los datos se les restó la influencia de las paredes (figs 6.1). Por otro lado, las diferencias obtenidas en la comparación de los puntos experimentales con la curva de shields (figs 5.11a a 5.11d y 6.1a a 6.1h) se atribuyen a que dicha curva fue deducida con un fondo plano formado por sedimentos de las mismas características que los que se analizaban en la condición crítica de movimiento, con un Δ aproximado de 1.65; aquí las partículas se depositaban sobre un fondo fijo y el valor de Δ siempre fue menor que aquel. Prueba de lo anterior es que las partículas estudiadas con valores de Δ cercanos a 1.65 (arena y baquelita) dieron los mejores resultados.

Del análisis de los resultados obtenidos con los parámetros R_* y r_* a partir de las mediciones, la corrección de pared y por medio de la ley de defecto de velocidades, puede deducirse que las diferencias que se encuentran se atribuyen a consideraciones de tipo experimental, del análisis de los datos y de algunos fenómenos que no se tomaron en cuenta en el desarrollo de las dos anteriores, como la capa límite por ejemplo.

Finalmente los resultados aquí obtenidos podrían aplicarse como una primera instancia a canales artificiales sobre los cuales se depositen partículas sobre un fondo fijo.

BIBLIOGRAFIA

1. Berezowsky M. (1980). *Escorrentamiento a Superficie libre*. capitulo A.2.9 del manual de diseño de obras civiles, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad.
2. Breusers, H.N.C. (1983-84). *International course in Hydraulic Engineering*. Lecture notes on sediment transport 1. Delft, Holanda.
3. Chow, V. T. (1982). *Hidráulica de los canales abiertos*. Ed. Diana, México.
4. Chargoy, E. (1974). *Cuantificación del arrastre litoral y la aplicación en Laguna Verde, Veracruz*. Tesis de licenciatura, UNAM, México.
5. Daily, J.W., y Harleman, D.R. (1981). *Dinámica de los fluidos* Ed. Trillas, México.
6. Echávez, G. (1985). *Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo*. Apuntes de clase, DEPMI, UNAM. México.
7. Frias, A. y Gonzalo, C. (1986). *Ingeniería de costas*. Edición de la Asociación mexicana de Ingeniería Portuaria. IPN.,

México.

8. García M. y Maza J.A. (1986) *Resistencia al flujo en el fondo y corrección de pared en canales estrechos*. XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, vol. 3 Sao Paulo, Brasil.
9. García F.M. y Maza J.A. (1988) *Flujo supercrítico sobre arenas y gravas. Estudio experimental*. XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, tema 4. La Habana, Cuba.
10. Graf, W. H. (1971). *Hydraulics of sediment transport*. Mc Graw Hill. EUA.
11. Henderson, FM. (1966) *Open Channel Flow*. McMillan publishing CO.INC, New York, EUA.
12. Juárez, E y Rico, A. (1980). *Mecánica de suelos*. Tomo 1. Editorial Limusa. México.
13. Kobayashi, N. y Nam Seo, S. (1985). *Fluid and sediment interaction over a plane bed*. Journal of hydraulic engineering. Volumen 111, No 6. ASCE. New York, EUA.
14. Kobus, H. (1980). *Hydraulic Modelling*. German association for water resources and land improvement. Bonn, RFA.
15. Kuan M, Yao. (1975). *Extended plain sedimentation*. Journal of the environmental engineering division. Junio de 1975. EUA.

16. Madsen, O. S. (1975). *Sediment transport and coastal processes*. Massachusetts Institute of Technology, EUA.
17. Maza, J. A. (1987) *Hidráulica Fluvial*. Apuntes de clase. DEPFI, UNAM.
18. Maza, J.A. (1987) *Seminario de Hidráulica Fluvial*. Apuntes de clase. DEPFI, UNAM.
19. Maza J.A., Camargo, J. y Franco V. (1983) *Hidráulica Fluvial*. Capítulo A.2.11, Instituto de Investigaciones Eléctricas. Comisión Federal de Electricidad, Mexico.
20. Maza, J. A.; García, M. y Fuentes, R. (1980). *Contribución al estudio de sedimentos fluviales*. Memoria 6o congreso nacional de Hidráulica, Tomo IV. Yucatán, México.
21. Maza Alvarez, J. A. y Franco, V. (1983). *Técnicas experimentales*. Capítulo A.2.15. Manual de diseño de obras civiles. Edición del Instituto de Investigaciones Eléctricas, CFE. México.
22. Maza, J.A. y García, M. (1984). *Hidrodinámica, base para hidráulica fluvial*. Series del Instituto de Ingeniería No D-20, U.N.A.M, México.
23. Murphy, P.J. y Aguirre, E. J. (1985). *Bed load or suspended load*. Journal of hydraulic engineering. Volumen 111, No 1. A.S.C.E. New York, EUA.

24. Novak, P. y Čabelka, J. (1981) *Models in Hydraulic*. Pitman, Gran Bretaña.
25. Raudkivi, A. J. (1976). *Loose boundary hydraulics*. Pergamon International library. Gran Bretaña.
26. Rouse, H. y Simon, I. (1980). *History of Hydraulics*. Iowa Institute of Hydraulic research. EUA.
27. Ruiz Bouillosa, R. (1985). *Láser. Breve introducción y algunas demostraciones sencillas*. PubliUNAM. México.
28. Sanchez, J. L. (1967). *Instructivo para concreto*. Dirección de proyectos, Departamento de Ingeniería experimental SRH. México.
29. Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1967) *Mecánica de Suelos*. Instructivo para ensaye de suelos. Editado por la dirección de información.
30. Sotelo, G. (1984). *Hidráulica general*. Volumen 1. Editorial Limusa. México.
31. Tienza, M. B. y González N, L. (1982). *Integración espacial de un trazador radioactivo para cuantificar el transporte de la capa de fondo en ríos*. Memoria 10o congreso latinoamericano de Hidráulica. México, DF.

32. Wen Shen, H. (1971). *River mechanics*. Volumen II Recopilación de artículos. Capítulos 21 y 25. Editor: Hsieh Wen Shen. Colorado, EUA.

33. Willis, J. C. (1985). *Near bed velocity distribution*. *Journal of hydraulic engineering*. Volumen 111, No 5. ASCE. New York, EUA.