

47
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PREDICCION
DE EROSION MARGINAL
EN RIOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
CARLOS GONZALO FRANCO DOMINGUEZ



TESIS CON
VALIA DE ORIGEN

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D.F.

1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

INDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 2 | Obtención del esfuerzo cortante crítico en suelos cohesivos | 3 |
| 2.1 | Prueba PINHOLE para la determinación de suelos dispersivos | 7 |
| 2.1.1 | Descripción general de la prueba | 7 |
| 2.1.2 | Aplicación en problemas de erosión marginal | 11 |
| 2.2 | Método cuantitativo para predecir el esfuerzo cortante crítico y tasa de erosión en muestras inalteradas de suelos cohesivos | 11 |
| 2.3 | Determinación de la tasa de erosión | 12 |
| 2.4 | Secuencia de cálculo de la tasa de erosión marginal | 15 |
| 2.5 | Aplicación | 17 |
| 3 | Modelo de falla del talud | 18 |
| 3.1 | Relaciones de estabilidad de la margen del río | 18 |
| 3.1.1 | Falla inicial del talud | 19 |
| 3.1.2 | Determinación del ángulo de falla plana | 23 |
| 3.1.3 | Falla paralela del talud | 23 |
| 3.1.4 | Secuencia de cálculo | 26 |
| | Ejemplo | 27 |
| 4 | Metodología de cálculo | 29 |
| 4.1 | Programas de cálculo de falla de talud | 29 |
| 4.2 | Generación y discusión de gráficas para el cálculo de estabilidad de talud | 30 |
| | Ejemplo | 39 |
| 4.3 | Cálculo simultáneo de erosión y falla de talud | 42 |
| 5 | Aplicaciones | 45 |
| 5.1 | Descripción del problema | 45 |
| 5.2 | Revisión de taludes actuales | 46 |
| 5.2.1 | Obtención de parámetros de resistencia preliminares | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3 Predicción de fallas | 51 |
| 5.4 Cálculo del tiempo en que el río absorbe el material de un caído de talud. | 55 |
| 6 Conclusiones | 59 |
| Apéndice. Listados de programas e instructivos de uso | 63 |
| Agradecimientos | 73 |
| Referencias | 74 |

1. INTRODUCCION

La planeación del uso del suelo en un valle aluvial, así como la selección de lugares para construir puentes y estructuras hidráulicas, requiere de la predicción de los cambios que sufrirá un río.

Los cambios que sufren las márgenes se deben, ya sea, al arrastre de partículas del material de la orilla por la corriente (erosión marginal), por falla de talud debida a fuerzas gravitacionales, o por una combinación de ambos fenómenos.

Estos procesos involucran una gran cantidad de factores como la resistencia al corte del suelo, el peso específico del material, las propiedades fisicoquímicas del suelo, la altura de la orilla, la forma de la sección transversal, el nivel de aguas freáticas, la permeabilidad del material, la estratigrafía de la zona, las grietas de tensión, la vegetación del lugar, las construcciones cercanas, etc, que hacen complicado el problema.

El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de una metodología de cálculo para determinar la estabilidad de las márgenes de un río cuando interactúan la erosión marginal con el movimiento del fondo del río.

A continuación se muestra un resumen del contenido de este trabajo.

Después de la Introducción, en el cap 2 se trata el problema de la obtención del esfuerzo cortante crítico en suelos cohesivos, se presenta un resumen de investigaciones al respecto y se discuten dos métodos, uno para determinar si una arcilla es dispersiva, prueba Pinhole, y otro que trata de predecir el esfuerzo cortante crítico y la tasa de erosión en muestras inalteradas de suelos cohesivos.

En el cap 3 se desarrollan las expresiones para calcular la altura crítica de un talud de acuerdo al tipo de falla que se presente, ya sea falla inicial o falla paralela. Para redondear la discusión, se incluye un ejemplo donde se calcula la altura crítica de un talud cuando se presenta la falla inicial.

En el cap 4 se explica la metodología de cálculo en la que se basan los programas de cálculo de falla de talud, y la generación de gráficas adimensionales para determinar la estabilidad de las márgenes para cualquier condición de erosión marginal y de fondo. Aquí también se incluye un ejemplo y se explica como se acopla el modelo de falla de talud al del movimiento del fondo del río.

La aplicación del modelo a un problema real se trata en el cap 5. El río en estudio es el río Mezcalapa-Samaría en el estado de Tabasco, México. Se estudia la estabilidad de las márgenes en un tramo de aproximadamente 30 km.

En el cap 6 se presentan las conclusiones derivadas del estudio y finalmente, en el Apéndice se pueden ver los listados de los programas con sus instructivos de uso.

2. OBTENCION DEL ESFUERZO CORTANTE CRITICO EN SUELOS COHESIVOS

La erosión de suelos es un fenómeno complejo donde intervienen diferentes mecanismos y características del flujo y de los suelos. Para comprenderlo mejor, se ha tratado de determinar cuáles de las características del suelo afectan al fenómeno.

Los tipos de parámetros del suelo que se necesitan para determinar la susceptibilidad a la erosión varían substancialmente si se trata de suelos cohesivos o no cohesivos. La susceptibilidad a la erosión de un suelo no cohesivo está controlada por fuerzas gravitacionales y características del suelo como la distribución del tamaño de los granos, la densidad de las partículas y la forma de los granos. Se puede ver un estudio detallado de erosión en suelos no cohesivos en Graf[1971]. En general, los criterios son de dos tipos: velocidad crítica o cortante crítico. Estos criterios son conocidos y se resumen por ejemplo en Maza et al[1981] y por ello no se discuten aquí. En general, se emplea el criterio de Shields con el que se determina el esfuerzo cortante crítico que se compara con el esfuerzo que produce el flujo; este esfuerzo actuante se reduce del orden de 25 por ciento en el caso de las márgenes, para incluir el efecto de la inclinación del talud, ver figs 2.1.

Por otro lado, en la erosión en suelos cohesivos intervienen fenómenos físicoquímicos, así como la estructura del suelo y su interacción con el flujo.

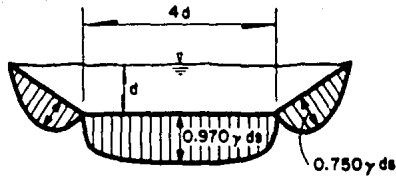


Fig 2.1a Variación del esfuerzo cortante producido por el flujo τ en secciones transversales trapezoidales

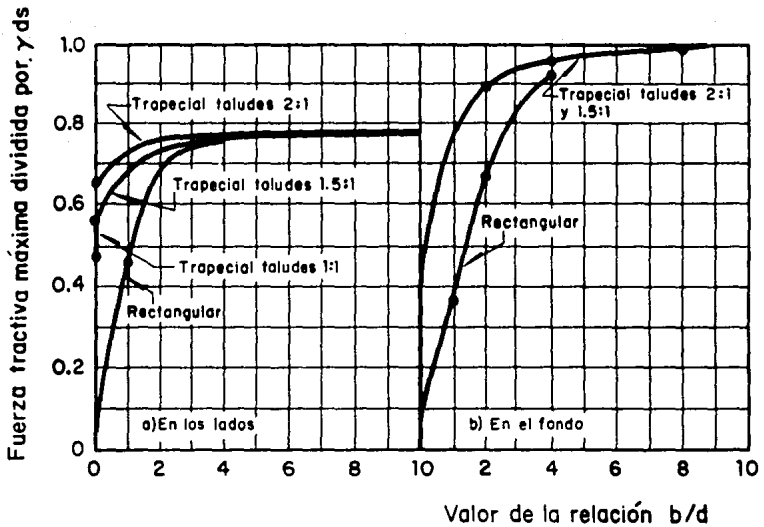


Fig 2.1b Fuerza tractiva máxima vs b/d

La capacidad de erosión de suelos cohesivos en general está afectada por las siguientes características : a) cantidad y tipo de la parte cohesiva; b) composición química del líquido en los poros; c) contenido de materia orgánica, yeso y otros agentes cementantes; d) distribución del tamaño de los granos de la parte no cohesiva; e) localización en el campo, tixotropía e historia de esfuerzos del suelo; f) pH del suelo, temperatura y contenido de agua; g) composición química, temperatura y pH del flujo.

En la tabla 2.1 se ve una recopilación de propiedades que distintos investigadores consideran importantes en el fenómeno de erosión de materiales cohesivos. Las referencias de la tabla se pueden ver en Grissinger[1982].

Tabla 2.1 Resumen de las propiedades que tienen influencia o están relacionadas con la susceptibilidad a la erosión de materiales cohesivos.

| INVESTIGADOR | PROPIEDADES |
|--------------------------------|---|
| Abdel-Rahman[1964] | Resistencia al corte (veleta), rugosidad de la superficie de la muestra |
| Ariathurai y Arulanandan[1978] | Tipo y cantidad de arcilla, temperatura del agua, contenido de materia orgánica, calidad química del agua erosiva, historia de esfuerzos |
| Arulanandan et al[1973] | Relación de adsorción de sodio, conductividad eléctrica y la magnitud de la dispersión dieléctrica, estos valores reflejan el tipo y cantidad de arcilla y la calidad química del sistema |
| Carlson y Enger[1963] | Resistencia al corte (veleta), densidad aparente, límite líquido, índice de plasticidad |
| Christensen y Das[1973] | Tipo y cantidad de arcilla, rugosidad de la superficie de la muestra |
| Dash[1968] | Contenido de arcilla, esfuerzos de tensión, contenido de agua de la muestra, número de Reynolds |
| Dunn[1959] | Resistencia al corte (veleta) |
| Einsele et al[1974] | Contenido de arcilla, relación de vacíos, resistencia al corte, historia geológica (tipo de consolidación) |
| Enger et al[1960] | Límite líquido, índice de plasticidad |
| Flaxman[1963] | Resistencia a la compresión no confinada |
| Fortier y Scobey[1926] | Concentración y tipo de sedimento en suspensión |
| Gibbs[1962] | Características plásticas, densidad aparente |

Tabla 2.1 Continuación

| | |
|-----------------------------|--|
| Goss[1973] | Contenido de arcilla |
| Grissinger[1966], [1972] | Densidad aparente, temperatura del agua, contenido de agua de la muestra, orientación y tipo de arcilla, velocidad de humedecimiento |
| Grissinger y Asmussen[1963] | Envejecimiento en húmedo antes del evento erosivo |
| Grissinger et al[1981] | Contenido de arcilla, contenido de agua inicial de la muestra, velocidad máxima no erosiva (Pinhole), morfología de la muestra |
| Karasev[1964] | Factores físicos que interactúan con el flujo |
| Kuti y Yen[1976] | Contenido de arcilla, índice plástico, calidad química del flujo erosivo, no influye la relación de vacíos |
| Laflen y Beasley[1960] | Relación de vacíos, tipo de suelo |
| Lambermont y Lebon[1978] | Composición fisicoquímica instantánea de la capa superficial |
| Liou[1967], [1970] | Tipo de arcilla, tendencia a la expansión, aditivos químicos, pH, temperatura del agua, no influye la resistencia al corte (veleta) |
| Lyle y Smerdon[1965] | Compactación, relación Ca/Na, tamaño medio de las partículas, contenido de materia orgánica, cociente de dispersión, resistencia al corte (veleta), límites de Atterberg |
| Mirtskhulava[1966] | Penetración como una medida de cohesión, heterogeneidad de la muestra |
| Moore y Mash[1962] | Número de Reynolds |
| Partheniades[1965] | No influye ni la resistencia al corte macroscópica ni la concentración del sedimento |
| Pierce et al[1970] | Material erosionado |
| Rektorik y Smerdon[1964] | Contenido de agua de la muestra, resistencia al corte (veleta), relación de vacíos |
| Sargunan[1976] | Tipo de arcilla, tipo y concentración de iones en el agua de los poros y en el flujo erosivo |
| Sherard et al[1976] | Varias medidas de dispersión |
| Smerdon y Beasley[1959] | Índice plástico, cociente de dispersión, contenido de arcilla, tamaño medio de las partículas |
| Sutherland[1966] | Turbulencia |
| Swain et al[1975] | Fuerzas de arrastre y sustentación, presión de poro |
| Swanberg[1966] | Contenido de agua de la muestra, no influye ni la resistencia a la compresión no confinada ni la resistencia a la tensión |

De la revisión bibliográfica, se han elegido dos criterios considerados como los más útiles para determinar parámetros que influyen directamente en la erosión de suelos cohesivos. Dada la complejidad del fenómeno, no existe aún un criterio único y general y todavía se tiene una gran incertidumbre en el tema.

2.1 PRUEBA PINHOLE PARA LA DETERMINACION DE SUELOS DISPERSIVOS

La prueba Pinhole fue diseñada específicamente con el propósito de identificar las arcillas dispersivas y no como una prueba cuantitativa para medir velocidades de erosión como una función de la velocidad del agua. Sin embargo, algunos investigadores como Grissinger et al[1981] toman a la velocidad máxima no erosiva de la prueba Pinhole como un parámetro relacionado a la susceptibilidad a la erosión de materiales cohesivos.

Esta prueba de laboratorio se desarrolló para medir directamente la dispersibilidad o erosión coloidal de suelos finos compactados. El agua que corre a través de muestras de arcillas dispersivas produce una suspensión coloreada de partículas coloidales, mientras que el agua que pasa a través de arcillas resistentes a la erosión es cristalina. El principal propósito de la prueba es la identificación de suelos finos dispersivos, altamente erosionables y con un alto contenido de sodio.

Como resultado de investigaciones de este tipo, se ha llegado a comprender mejor que hay un cierto tipo de arcillas, llamadas dispersivas, que son altamente erosionables. La diferencia principal entre las arcillas dispersivas y las arcillas ordinarias resistentes a la erosión es el tipo de cationes que contiene el agua de los poros. Las arcillas dispersivas contienen principalmente sodio, mientras que las arcillas ordinarias contienen cationes de calcio y magnesio. El descubrimiento de la existencia de estas arcillas ha explicado muchas fallas en cortinas de materiales graduados y problemas de erosión en otras estructuras de tierra.

2.1.1 DESCRIPCION GENERAL DE LA PRUEBA

En las figs 2.2 y 2.3 se muestra el dispositivo experimental empleado en esta prueba en la que se hace pasar agua destilada a través de un orificio de 1 mm de diámetro hecho en una muestra de arcilla de 25.4 mm (1 pulgada) de espesor. Inicialmente se tiene una carga hidráulica de 50

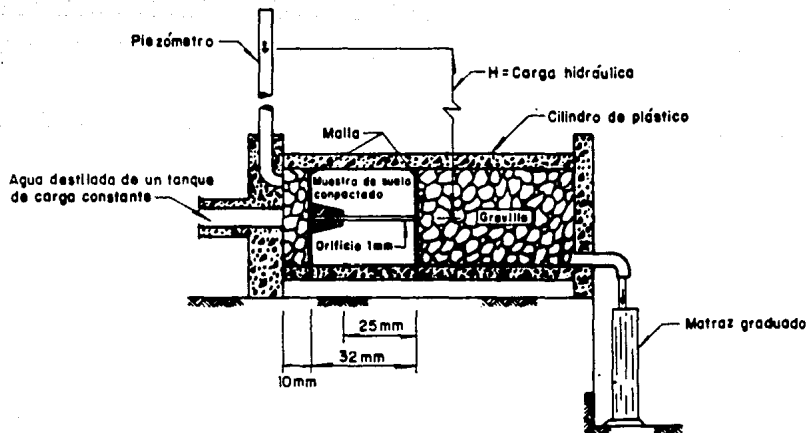


Fig 2.2 Equipo para realizar la prueba PINHOLE

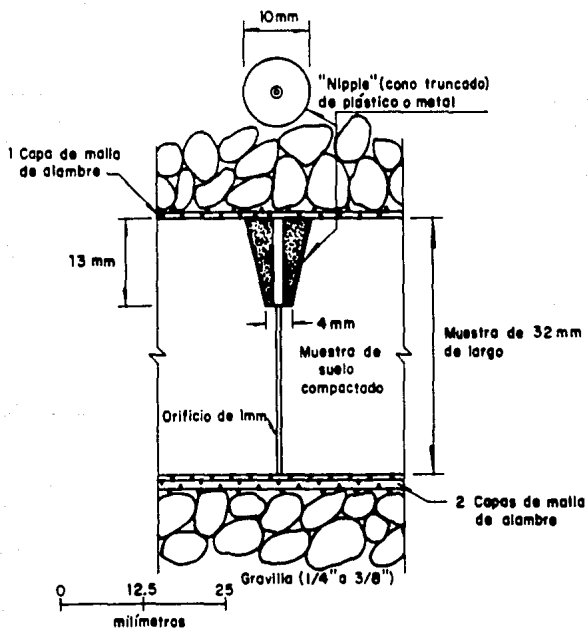


Fig 2.3 Sección a través de la muestra

mm y se eleva en etapas de 5 min cada una, a 180 mm, 380 mm y 1020 mm. En cada incremento se obtiene la velocidad del flujo y se observa el color del agua, si existe. En Sherard et al[1976] se puede ver el procedimiento detallado de la prueba.

La diferencia principal entre las arcillas dispersivas y las resistentes a la erosión se dan con una carga hidráulica menor de 50 mm. Para la arcilla dispersiva, el flujo que sale de la muestra se encuentra visiblemente coloreado y no cambia con el tiempo. Antes de 10 min el orificio crece hasta 3 mm, o más, y la prueba termina. En el caso de una arcilla resistente a la erosión (no dispersiva), el flujo que sale es completamente claro, o se vuelve completamente claro en unos cuantos segundos y además el orificio no se erosiona. Para las arcillas altamente resistentes a la erosión, no hay un color visible en el agua y la velocidad del flujo permanece constante bajo cada condición de flujo, además de que el orificio de la muestra no incrementa su tamaño. La prueba es sencilla, fácilmente reproducible y puede llevarse a cabo en cualquier laboratorio de mecánica de suelos.

En la fig 2.4, se puede ver que la velocidad del flujo a través del orificio de la muestra de suelo compactado, se encuentra entre 0.30 m/s y 0.6 m/s cuando la carga es de 50 mm y alrededor de 3.0 m/s bajo 1020 mm de carga.

El resultado de la prueba se evalúa de acuerdo a la apariencia del agua, la velocidad del flujo y el tamaño final del orificio de la muestra. La muestra se clasifica en una de las seis categorías que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Categorías de los resultados de la prueba Pinhole

| Clasificación de resultados | Clasificación del suelo |
|-----------------------------|--|
| D1 y D2 | Suelo dispersivo : falla rápidamente bajo 50 mm de carga. |
| ND4 y ND3 | Suelo intermedio : se erosiona lentamente bajo 50 mm o 180 mm de carga. |
| ND2 y ND1 | Suelo no dispersivo : no existe erosión coloidal bajo 380 mm o 1020 mm de carga. |

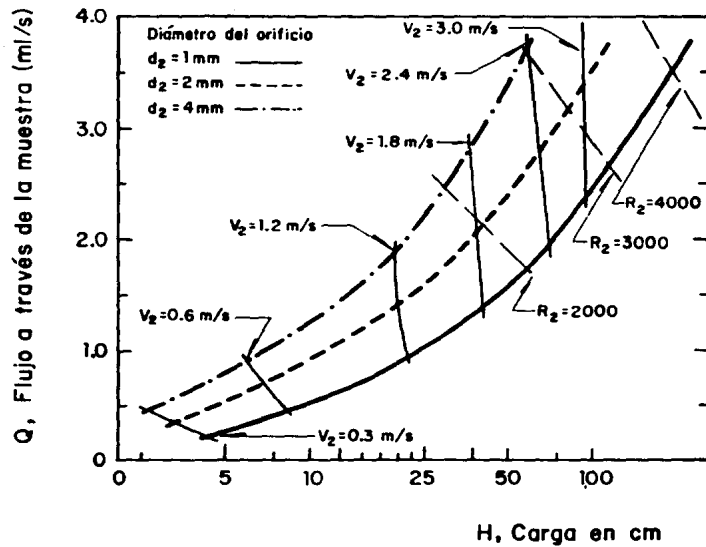


Fig 2.4 Velocidades del agua en la prueba PINHOLE

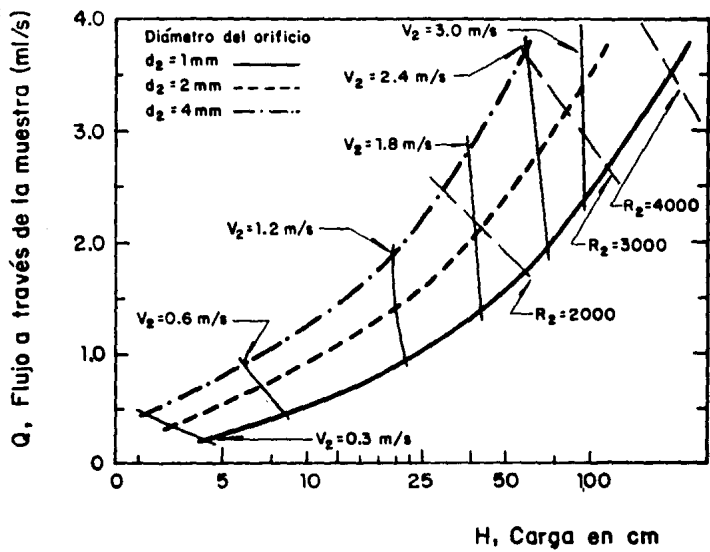


Fig 2.4 Velocidades del agua en la prueba PINHOLE

En varios estudios realizados con la prueba Pinhole por Sherard et al(1976), la mayoría de muestras probadas resultaron ser, o dispersivas o no dispersivas, y sólo un pequeño porcentaje dió resultados intermedios.

2.1.2 APLICACION EN PROBLEMAS DE EROSION MARGINAL

La prueba es útil para determinar si un suelo es erosivo o no; permite estimar la velocidad máxima no erosiva que podría definirse como velocidad crítica; no permite por otro lado, evaluación de la tasa de erosión para distintas velocidades de flujo aunque podría intentarse obtener alguna relación entre la velocidad del flujo y la velocidad con que se agranda el agujero en la muestra; sin embargo esto requeriría una verificación experimental para encontrar si este resultado es consistente.

2.2 METODO CUANTITATIVO PARA PREDECIR EL ESFUERZO CORTANTE CRITICO Y TASA DE EROSION EN MUESTRAS INALTERADAS DE SUELOS COHESIVOS

La tasa de erosión lateral depende, para un esfuerzo cortante actuante producido por el flujo, principalmente de las características fisicoquímicas del suelo y del tipo y cantidad de sales en los poros del material y del flujo. Por ejemplo, un aumento del contenido de arcilla o la disminución de los iones de sodio en el suelo, provoca un incremento en la resistencia del suelo a la erosión. Por otro lado, si se reduce el contenido de arcilla o el contenido de sales en el flujo, se reduce también la resistencia a la erosión del suelo.

Si el esfuerzo cortante del escurrimiento, τ , no sobrepasa el esfuerzo cortante crítico, τ_c , no habrá erosión en el suelo. Arulanandan et al(1980) proponen un método para calcular el esfuerzo cortante crítico en suelos cohesivos, así como la tasa y el grado de erosión; para estos autores son importantes las siguientes propiedades electroquímicas del suelo :

RELACION DE ADSORCION DE SODIO, (SAR). Se define como :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

donde Na, Ca y Mg son las concentraciones de cationes solubles (sodio, calcio y magnesio, respectivamente) expresados en miliequivalentes por litro.

CONCENTRACION DE SALES EN EL AGUA DE LOS POROS DEL SUELO, (CONC). Es la

concentración total de los cationes metálicos principales (calcio, magnesio, sodio y potasio) y de los aniones (carbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, silicatos y boro) en el agua de los poros del suelo, expresado en miliequivalentes por litro.

DISPERSION DIELECTRICA, ($\Delta\epsilon_0$). La magnitud de la dispersión dieléctrica se define como la disminución de la constante dieléctrica aparente, cuando la frecuencia de una corriente alterna pasa a través de una muestra saturada de suelo incrementándose de 5 a 50 megaciclos por segundo. La constante dieléctrica aparente puede calcularse con la ecuación :

$$c = \frac{C d}{\epsilon_v A}$$

donde :

- C capacitancia de la muestra saturada de suelo
- d longitud de la muestra
- A área transversal de la muestra
- ϵ_v constante dieléctrica del vacío (8.85×10^{-14} farad/cm)

La constante dieléctrica es una medida de la capacidad de la muestra de suelo para almacenar potencial eléctrico en su superficie, bajo la influencia de un campo eléctrico. En Arulanandan et al[1980] y en Secretaría de Agricultura y Ganadería[1963] se describe la obtención de estos parámetros.

2.3 DETERMINACION DE LA TASA DE EROSION

Arulanandan et al[1980] midieron además en sus experimentos el volumen de suelo que iba siendo erosionado. Con esto obtuvieron la fig 2.6 que permite calcular la relación de cambio de la tasa de erosión, R_p , como una función del esfuerzo cortante crítico en el suelo. En el intervalo de valores de $0.06 \text{ kg/m}^2 < \tau_c < 0.2 \text{ kg/m}^2$, propusieron primero obtener la variación en la relación de cambio de la tasa de erosión en función de τ_c , con la siguiente relación exponencial negativa :

$$R_p = 21.86 e^{-12.75\tau_c} \quad (2.1)$$

donde :

- R_p relación de cambio de la tasa de erosión, en l/min

Si se utiliza la curva dibujada en la fig 2.6, cuando τ_c es mayor de 0.2 kg/m^2 , se obtiene un valor de R_p pequeño pero prácticamente constante, esto es, aun cuando la orilla es firme, compacta y resistente a la

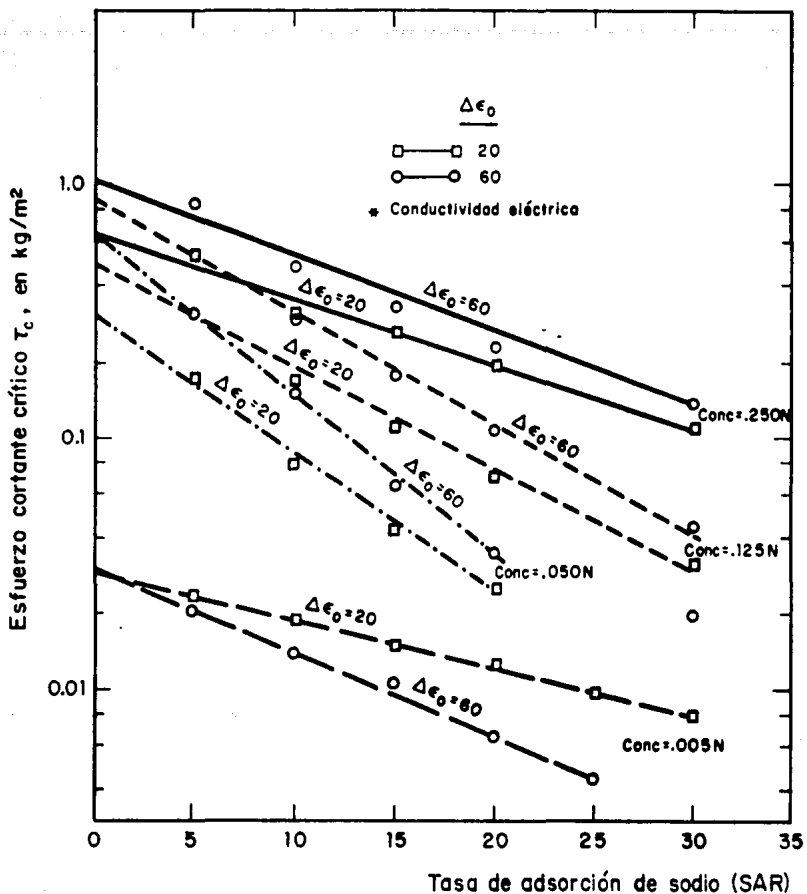


Fig 2.5 Esfuerzo cortante crítico τ_c vs SAR para diferentes valores del contenido de sales en el agua de los poros del suelo (CONC) y de la dispersión dieléctrica $\Delta\epsilon_0$

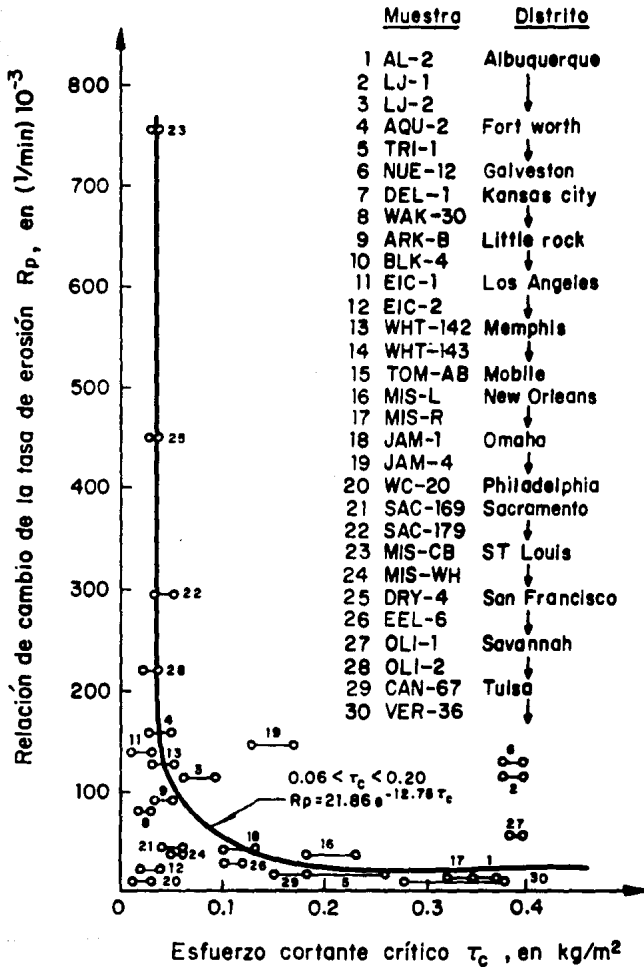


Fig 2.6 Relación de cambio de la tasa de erosión (R_p) vs esfuerzo cortante crítico τ_c para muestras inalteradas probadas utilizando agua destilada como fluido erosivo

erosión, se tiene erosión, lo cual no es necesariamente cierto. Por tanto, Osman y Thorne[1988] sugieren emplear la curva exponencial de la ec 2.1 aún para valores grandes de τ_c . Esto se justifica dado que, a medida que el valor de τ_c aumenta, R_p debe tender a cero. Por otro lado, dado que están analizando suelos cohesivos, el límite inferior de la curva es $\tau_c = 0.06 \text{ kg/m}^2$ dado que para esfuerzos cortantes críticos menores, el suelo generalmente se comporta como no cohesivo.

La tasa de erosión del suelo, R , en $\text{kg de suelo/m}^2\text{-min}$, está dada por:

$$R = \tau_c R_p \quad (2.2)$$

y si se emplea la ec 2.1

$$R = 21.86 \tau_c e^{-12.75\tau_c} \quad (2.3)$$

Para obtener la tasa de erosión en la margen se divide R entre el peso específico del suelo, esto es

$$dB = R/\gamma_s \quad (2.4)$$

donde :

dB tasa inicial de erosión, en m/min
 γ_s peso específico del suelo, en kg/m^3

dB es entonces el material erosionado, en metros, por área unitaria de suelo expuesta al agua en cada minuto.

2.4 SECUENCIA DE CALCULO DE LA TASA DE EROSION MARGINAL

1. Se calcula el esfuerzo cortante actuante por el flujo con

$$\tau = \gamma R_h S \quad (2.5)$$

donde :

τ esfuerzo cortante, en kg/m^2
 γ peso específico del agua, en kg/m^3
 R_h radio hidráulico, en m
 S pendiente de energía

Como se comentó al principio de este capítulo, la distribución de esfuerzos cortantes en la frontera de secciones transversales, se supone como se muestra en las figs 2.1; debe tomarse en cuenta que la geometría del canal se modifica debido a la erosión marginal y al cambio de elevación del fondo, alterando la geometría de la sección. Dado que en general los ríos son muy anchos, puede considerarse al esfuerzo cortante en las márgenes como 80 por ciento del obtenido con la ec 2.5.

2. Para una muestra inalterada de suelo, se determina la relación de

adsorción de sodio (SAR), el contenido de sales en el agua de los poros del suelo (CONC), la dispersión dieléctrica ($\Delta\epsilon_0$) y el peso volumétrico del suelo (γ_s).

3. Se determina el esfuerzo cortante crítico que resiste el suelo, τ_c , con la fig 2.5

4. Se revisa la desigualdad $\tau \geq \tau_c$. Si se cumple ir al paso 5, si no, no habrá erosión en el suelo.

5. Se determina la tasa inicial de erosión del suelo, R, con la ec 2.3

6. Se determina la tasa inicial de erosión lateral en una margen con la ec 2.4

7. Se supone que una vez que el esfuerzo cortante crítico es sobrepasado, la tasa de erosión del suelo R, tiene un incremento aproximadamente lineal con respecto al esfuerzo cortante. Por lo que, la tasa real de erosión, dW, es :

$$dW = dB \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right] \quad (2.6)$$

donde :

dW tasa real de erosión, en m/min

y si la duración del cortante producido por el flujo τ , es Δt , entonces la longitud de erosión lateral durante este tiempo, será :

$$\Delta W = dW \Delta t \quad (2.7)$$

donde :

ΔW longitud de erosión lateral, en m

Δt duración del cortante producido por el flujo, en min

La ec 2.7 permite calcular la erosión en una margen; si las dos márgenes están constituidas del mismo material, la erosión será del doble. Cabe hacer notar que el esfuerzo cortante crítico, τ_c , obtenido en el paso 3 de la fig 2.5, representa el límite inferior para la muestra de suelo probada, ya que Arulanandan et al[1980] utilizaron agua destilada como flujo erosivo en sus experimentos. Si el flujo contiene sales disueltas, como es normal en los ríos, el esfuerzo cortante crítico puede ser mayor. Por otro lado, puede resultar que el ΔW calculado no corresponda a valores físicamente reales o con observaciones de campo, por lo que se puede hacer uso de un factor de calibración para ajustarlo a valores

reales, como sugieren Wolman[1959], Hooke[1979] y Thorne[1981].

2.5 APLICACION

El siguiente ejemplo muestra como aplicar los pasos anteriores para predecir el esfuerzo crítico del suelo τ_c , la tasa de erosión del suelo R , y la distancia de erosión lateral ΔW , para una muestra de suelo tomada de una orilla tiene las siguientes propiedades : SAR = 10; $\Delta c = 20$; CONC = 0.250 N y $\gamma_s = 1762.56 \text{ kg/m}^3$. En el periodo considerado se presentó un esfuerzo cortante producido por el flujo, $\tau = 1.0 \text{ kg/m}^2$.

Con los valores dados anteriormente de SAR, CONC y Δc y con la fig 2.5 se ve que $\tau_c = 0.38 \text{ kg/m}^2$. Como se puede ver $\tau > \tau_c$, por lo que sí se presenta erosión marginal.

A partir de la ec 2.3 y utilizando el valor de τ_c se obtiene el valor de la tasa inicial de erosión del suelo, $R = 0.065 \text{ kg/(m}^2 \text{ min)}$. La tasa inicial de erosión en la margen se calcula con la ec 2.4, resultando $\text{dB} = 3.708 \times 10^{-5} \text{ m/min}$. Al emplear la ec 2.6 se obtiene la tasa real de erosión, $\text{dW} = 6.05 \times 10^{-5} \text{ m/min}$. Si se considera que la duración del esfuerzo cortante producido por el flujo de un día, es decir $\Delta t = 1440 \text{ min}$, tenemos que la longitud de erosión marginal, calculada con la ec 2.7, es $\Delta W = 0.087 \text{ m}$, es decir cerca de 10 cm en un día.

3. MODELO DE FALLA DEL TALUD

3.1. RELACIONES DE ESTABILIDAD DE LA MARGEN DEL RIO

Para poder estudiar la estabilidad de las márgenes de un río, Ponce[1978] y Thorne et al[1981], propusieron que la geometría de la orilla se considerara como se muestra en la fig 3.1a, y emplearon las relaciones clásicas de estabilidad de taludes desarrolladas en mecánica de suelos. Este procedimiento no es exacto dado que en los ríos, además de las irregularidades mismas de la topografía, la erosión lateral y la degradación del fondo modifican la geometría de la orilla, en la que se forma una pared casi vertical, como se ve en la fig 3.1b.

Osman y Thorne[1988] desarrollaron las ecuaciones de estabilidad que a continuación se muestran, tomando en cuenta el proceso de erosión. Estas ecuaciones pueden ser usadas para predecir la altura crítica de la orilla H, el ancho del bloque de falla BW, y el volumen de falla VB por unidad de longitud del río.

Para el análisis es necesario tomar en cuenta las siguientes suposiciones:

1. El suelo es cohesivo y relativamente homogéneo, por lo que se pueden usar las propiedades promedio del suelo
2. La superficie de falla pasa por el pie del talud. Otros tipos de falla no se consideran en el análisis, ya que este es el que se observa con

mayor frecuencia

3. Otros factores, como el tipo de vegetación, el nivel freático, el escurrimiento y la filtración, no se consideran en el análisis; sin embargo, pueden ser tomados en cuenta en casos especiales

4. Dependiendo del ángulo de inclinación del talud i , las márgenes de los ríos pueden ser clasificadas usando los esquemas de Taylor[1948] y de Lohnes y Handy[1968] como

- 1) orillas con pendiente fuerte $i > 60^\circ$
- 2) orillas con pendiente suave $i \leq 60^\circ$

5. Se supone que las orillas con pendiente fuerte fallan a lo largo de una superficie casi plana, mientras que las que tienen pendientes suaves muestran una superficie de falla curva. A menudo se encuentran márgenes que tienen una pendiente muy fuerte, en ocasiones con ángulos cercanos a 90° , especialmente en la orilla exterior de las curvas en los ríos; las ecuaciones que se muestran aquí, desarrolladas por Osman y Thorne[1988], son válidas sólo para orillas con pendiente fuerte. Se puede ver un análisis similar para orillas con pendiente suave en Osman[1985].

3.1.1. FALLA INICIAL DEL TALUD

La fig 3.1a muestra la geometría de una orilla antes de que se presenten la erosión lateral y la erosión del fondo; en la fig 3.1b se ve la misma orilla, con un cierto grado de erosión. A partir de estas figuras se definen las siguientes variables :

| | |
|-------------|---|
| ΔW | cambio en el ancho del fondo del río debido a la erosión lateral |
| ΔZ | degradación del fondo en el periodo de tiempo Δt |
| H_0 | altura inicial de la orilla medida desde el fondo del río |
| H' | altura de la orilla sobre el punto B |
| i | ángulo inicial de la orilla |
| β | ángulo de falla de la orilla con respecto a la horizontal |
| y | profundidad de la grieta de tensión |
| H | altura de la orilla sobre el fondo del río |
| γ | peso específico del suelo |
| c', ϕ' | cohesión y ángulo de fricción interna del material expresados en términos de esfuerzos efectivos. |

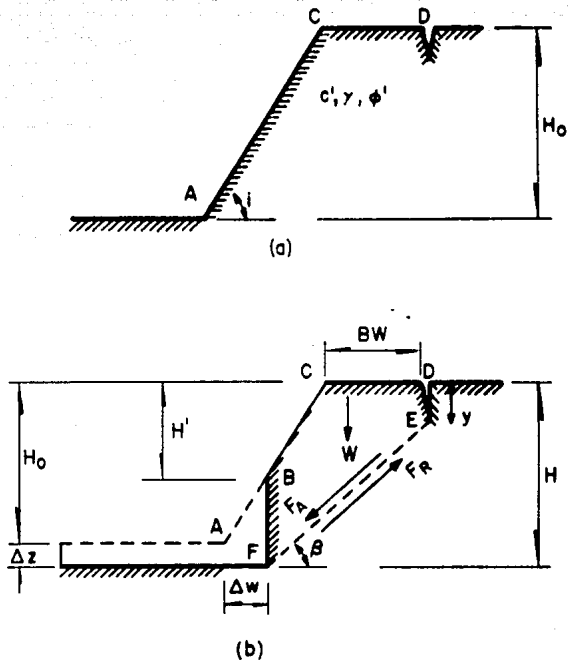


Fig 3.1 Falla inicial
 a) orilla antes de la erosión
 b) orilla después de la erosión a punto de fallar

El factor de seguridad, FS, se define como

$$FS = \frac{\text{fuerza resistente}}{\text{fuerza actuante}} = \frac{F_R}{F_A} \quad (3.1)$$

La fuerza resistente F_R es proporcional a la cohesión c' y al ángulo de fricción interna ϕ' , es decir

$$F_R = c'FE + N \tan \phi' \quad (3.2)$$

donde :

N es la componente del peso W_t , normal a la superficie de falla

$$N = W_t \cos \beta \quad (3.3)$$

FE es la longitud de la superficie de falla, de la fig 3.1b se ve que

$$FE = (H-y)/\text{sen } \beta \quad (3.4)$$

sustituyendo N y FE en la ec 3.2

$$F_R = \frac{(H-y)c'}{\text{sen } \beta} + W_t \cos \beta \tan \phi' \quad (3.5)$$

Por otro lado, la fuerza actuante F_A , está dada por

$$F_A = W_t \text{sen } \beta \quad (3.6)$$

donde :

W_t peso del bloque de falla, es decir

$$W_t = \frac{\gamma}{2} \left[\frac{H^2 - y^2}{\tan \beta} - \frac{H'^2}{\tan \alpha} \right] \quad (3.7)$$

por lo que

$$F_A = \frac{\gamma}{2} \left[\frac{H^2 - y^2}{\tan \beta} - \frac{H'^2}{\tan \alpha} \right] \text{sen } \beta \quad (3.8)$$

Sustituyendo F_R y F_A en la ec 3.1 y ordenando términos, queda la expresión de la siguiente manera

$$\begin{aligned} & (H^2 - y^2)(\text{sen } \beta \cos \beta - \cos^2 \beta \tan \phi) - (H - y) \frac{2c}{\gamma} \\ & + (\text{sen } \beta \cos \beta \tan \phi - \text{sen}^2 \beta) \frac{H'^2}{\tan \alpha} = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

donde :

$$c = \frac{c'}{FS} \quad (3.10a)$$

$$\tan \phi = \frac{\tan \phi'}{FS} \quad (3.10b)$$

Es conveniente incorporar el factor de seguridad FS, en los términos de la cohesión y del ángulo de fricción interna para que la incertidumbre que se tiene al obtener estos parámetros, pueda ser tomada en cuenta al seleccionar un factor de seguridad mayor que la unidad.

Si se define $y = K H$, donde $0 \leq K \leq 1$ y se divide la ec 3.9 entre H'^2 la ecuación queda

$$\left(\frac{H}{H'}\right)^2 (1 - K^2)(\sen \beta \cos \beta - \cos^2 \beta \tan \phi) - \left(\frac{H}{H'}\right)(1 - K) \frac{2c}{\gamma H'} + (\sen \beta \cos \beta \tan \phi - \sen^2 \beta) \frac{1}{\tan i} = 0 \quad (3.11)$$

o también

$$\lambda_1 \left(\frac{H}{H'}\right)^2 - \lambda_2 \left(\frac{H}{H'}\right) + \lambda_3 = 0 \quad (3.12)$$

que es una ecuación cuadrática en (H/H') , cuya solución está dada por

$$\frac{H}{H'} = \frac{\left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2 - 4 \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\right)} \right]}{2} \quad (3.13a)$$

donde :

$$\lambda_1 = (1 - K^2)(\sen \beta \cos \beta - \cos^2 \beta \tan \phi) \quad (3.13b)$$

$$\lambda_2 = 2(1-K) \frac{c}{\gamma H'} \quad (3.13c)$$

$$\lambda_3 = \frac{(\sen \beta \cos \beta \tan \phi - \sen^2 \beta)}{\tan i} \quad (3.13d)$$

Para una pared vertical

$$\beta \approx \frac{(90 + \phi)}{2} \quad (3.13e)$$

(La expresión exacta para el cálculo de β será obtenida más adelante). Debido a que el ángulo de fricción interna en la mayoría de las márgenes cohesivas es menor de 40° , $\beta > \phi$, por lo tanto

$$\lambda_1 = (1 - K^2) \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi) \geq 0 \quad (3.14)$$

Además, como i varía entre 60° y 90° , $\lambda_3 \leq 0$. Consecuentemente, la raíz de la ec 3.13a debe ser positiva y mayor que λ_2/λ_1 , esto es

$$\sqrt{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2 - 4 \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\right)} \geq \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (3.15)$$

por lo que el valor de interés de H/H' es

$$\frac{H}{H'} = \frac{\left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \sqrt{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2 - 4 \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\right)} \right]}{2} \quad (3.16)$$

En la ec 3.16, $H/H' \geq 1$. Si $H/H' = 1$ significa que el talud inicialmente se encuentra en la condición de estabilidad crítica y la solución de este problema se puede ver en Taylor[1948] y Lohnes y Handy[1968].

Finalmente de la fig 3.1b, el ancho del bloque de falla está dado por

$$BW = \left[\frac{H - y}{\tan \beta} - \frac{H'}{\tan i} \right] \quad (3.17)$$

y el volumen del bloque de falla por unidad de longitud se calcula como

$$VB = \frac{1}{2} \left[\frac{H^2 - y^2}{\tan \beta} - \frac{H'^2}{\tan i} \right] \quad (3.18)$$

3.1.2. DETERMINACION DEL ANGULO DE FALLA PLANA

Según Taylor[1948] y Spangler y Handy[1973] el ángulo β , entre la superficie de falla plana y la horizontal, corresponde al plano en el que la fuerza resistente alcanza el valor máximo. El ángulo β se puede encontrar derivando con respecto a β la ec 3.2. Utilizando este procedimiento se puede demostrar que

$$\tan 2\beta = \frac{\left[\frac{H}{H'} \right]^2 (1 - K^2) \tan i + \tan \phi}{1 - \left[\frac{H}{H'} \right]^2 (1 - K^2) \tan i \tan \phi} \quad (3.19a)$$

o también que

$$\tan 2\beta = \tan \left\{ \tan^{-1} \left[\left[\frac{H}{H'} \right]^2 (1 - K^2) \tan i \right] + \phi \right\} \quad (3.19b)$$

por lo tanto

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \tan^{-1} \left[\left[\frac{H}{H'} \right]^2 (1 - K^2) \tan i \right] + \phi \right\} \quad (3.20)$$

que es la ecuación general para el ángulo de falla β . Para el caso particular en el que la erosión lateral y la del fondo sean despreciables, y si además no existe grieta de tensión, es decir $H = H'$ (y por lo tanto $K = 0$), entonces la ec 3.20 se reduce a

$$\beta = \frac{1}{2} (i + \phi) \quad (3.21)$$

que es la ecuación dada por Taylor[1948] y Spangler y Handy[1973] para una pared vertical, ($i = 90^\circ$).

3.1.3. FALLA PARALELA DEL TALUD

Después de la falla inicial, fig 3.1b, la orilla adquiere una nueva geometría como se ve en la fig 3.2a. La fig 3.2b muestra la falla paralela con las variables que previamente se definieron. Es importante señalar que el ángulo de inclinación del talud ahora es β y no i .

De la fig 3.2b, se puede ver que

$$Wt = \frac{\gamma}{2} \left[\frac{H^2 - H'^2}{\tan \beta} \right] \quad (3.22)$$

por lo que

$$F_A = \frac{\gamma}{2} \left[\frac{H^2 - H'^2}{\tan \beta} \right] \text{sen } \beta \quad (3.23)$$

Sustituyendo las ecs 3.23, 3.5, 3.10a y 3.10b en la ec 3.1 y haciendo nuevamente $y = K H$, donde $0 \leq K \leq 1$, la ecuación queda

$$(H^2 - H'^2)(\cos \beta \text{sen } \beta - \cos^2 \beta \tan \phi) - H(1 - K) 2 \frac{c}{\gamma} = 0 \quad (3.24)$$

Dividiendo ahora entre H'^2 y ordenando términos

$$\omega_1 \left[\frac{H}{H'} \right]^2 - \omega_2 \left[\frac{H}{H'} \right] - \omega_1 = 0 \quad (3.25)$$

la cual también es una ecuación cuadrática en H/H' cuya solución está dada por

$$\frac{H}{H'} = \frac{\left[\frac{\omega_2}{\omega_1} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + 4} \right]}{2} \quad (3.26)$$

dado que $H/H' \geq 1$

$$\frac{H}{H'} = \frac{\left[\frac{\omega_2}{\omega_1} + \sqrt{\left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + 4} \right]}{2} \quad (3.27a)$$

donde :

$$\omega_1 = \cos \beta \text{sen } \beta - \cos^2 \beta \tan \phi \quad (3.27b)$$

$$\omega_2 = 2(1-K) \frac{c}{\gamma H'} \quad (3.27c)$$

De la fig 3.2b, el ancho del bloque de falla está dado por

$$BW = \frac{(H - H')}{\tan \beta} \quad (3.28)$$

y el volumen del bloque de falla por unidad de longitud es

$$VB = \frac{(H^2 - H'^2)}{2 \tan \beta} \quad (3.29)$$

En las ecs 3.16 y 3.27a, los términos λ_1 , λ_3 y ω_1 reflejan el efecto que la geometría de la orilla y las grietas de tensión producen en la altura crítica de la orilla, mientras que los términos λ_2 y ω_2 muestran cuanto se reduce el número $c/(\gamma H')$, por la presencia de las grietas de tensión.

La altura crítica ha sido determinada como una función explícita de las propiedades del suelo y de la geometría de la orilla. De hecho, la altura

crítica es también una variable dependiente del tiempo dado que la erosión lateral y la erosión del fondo actúan a través del tiempo alterando la geometría de la orilla.

3.1.4. SECUENCIA DE CALCULO

De las figs 3.1b y 3.2b, la altura crítica H, se define geoméricamente como

$$H = H' + \Delta W \tan i + \Delta Z \quad (3.30)$$

donde ΔW y ΔZ son el cambio en el ancho del fondo y la erosión del fondo, respectivamente, necesarios para llevar el talud a la falla. Se aclara que la erosión responsable de ΔW y ΔZ no ocurre instantáneamente, sino que es una función del tiempo, es decir

$$\Delta W = f(\tau_c, \tau) \quad (3.31)$$

$$\tau_c = f(\text{SAR}, \text{CONC}, \Delta c) \quad (3.32)$$

$$\tau = f(Q, R_h, S, \rho, g) \quad (3.33)$$

por lo tanto

$$\Delta W = f(Q, R_h, S, \rho, \text{SAR}, \text{CONC}, \Delta c, g, \text{etc}) \quad (3.34)$$

y como

$$\Delta Z = f(Q, R_h, S, \rho, \rho_s, D_w, g, \text{etc}) \quad (3.35)$$

se tiene finalmente que

$$H = f(Q, R_h, S, \rho, \text{SAR}, \text{CONC}, \Delta c, \rho_s, D_w, c', \phi', \gamma, H_o, y, g, \text{etc}) \quad (3.36)$$

donde :

- Q gasto del río
- R_h radio hidráulico
- S pendiente de energía
- ρ densidad del agua
- D_w tamaño característico del material del fondo.

La solución de las ecs 3.16 y 3.27a, para cualquier tiempo, requiere conocer el ángulo β. Con la ec 3.20 se determina al ángulo β en términos del ángulo de la orilla i y de la relación H/H' calculada de los valores H y H'. En general, ambas alturas varían con el tiempo; H varía en proporción con la erosión del fondo mientras que H' lo hace con relación a la tasa de erosión marginal. En otras palabras, la relación H/H' cambia de acuerdo a las características del flujo y del material del fondo y a la firmeza del material de la orilla.

1. Para un tiempo dado, se utilizan los valores conocidos de erosión del fondo ΔZ , y la distancia de erosión lateral ΔW , para determinar la altura de la margen sobre el fondo del cauce H, y la altura H' sobre el punto B,

(fig 3.1b)

$$H = H_0 + \Delta Z$$

$$H' = H_0 - \Delta W \tan i$$

donde :

H_0 altura inicial de la margen

$H' = H_0$ (inicialmente)

2. Se calcula la relación física $(H/H')_m$ utilizando estos valores
3. Se utiliza esta relación para calcular el ángulo β con la ec 3.20
4. Se obtienen los valores λ_1 , λ_2 y λ_3 , utilizando las ecs 3.13b-d
5. Se sustituyen estos valores en la ec 3.16 para encontrar la relación analítica $(H/H')_c$
6. Si $(H/H')_m$ calculada en el paso 2 es menor que $(H/H')_c$ calculada de la ec 3.16, entonces el talud es estable y H no es la altura crítica
7. Debido a que no hay falla, la erosión continúa durante el siguiente intervalo de tiempo. Por lo que se calculan los nuevos valores de ΔZ y ΔW y se regresa al paso 2, con $H = H + \Delta z$ y $H' = H' - \Delta w \tan i$
8. Si $(H/H')_m$ es aproximadamente igual a $(H/H')_c$, entonces $(H/H')_c$ es la solución de la ec 3.16 y H es la altura crítica de la margen
9. Se usan la ecs 3.17 y 3.18 para calcular el ancho del bloque de falla (BW) y el volumen (VB) por unidad de longitud del río
10. Si $(H/H')_m > (H/H')_c$, entonces la margen es inestable y la falla ya debe haber sucedido. En este caso, ΔZ y ΔW toman valores excesivamente grandes y se deben reducir.

Después que la orilla ha fallado, el nuevo ángulo del talud será β (falla paralela). Para fallas subsecuentes, se utilizan los pasos 1 y 2 para calcular $(H/H')_m$. El paso 3 sería redundante, dado que el ángulo β permanece constante en todo el tiempo. En el paso 4 se usan las ecs 3.27b y 3.27c para calcular ω_1 y ω_2 . El término ω_1 es constante ya que está en función de β y ϕ únicamente. Para calcular $(H/H')_c$ en el paso 5 se utiliza la ec 3.27a. En los pasos 6-8 se obtiene la altura crítica y en el paso 9 se calcula el ancho y el volumen del bloque de falla.

EJEMPLO

Para demostrar este procedimiento se utilizan los siguientes datos en el siguiente ejemplo. $H_0 = 1.5$ m; $i = 80^\circ$; $\gamma_s = 1540.2$ kg/m³; $\phi' = 7^\circ$ y $c' = 1326.0$ kg/m². Se considera que no se presentará erosión marginal, $FS = 1.0$ y que en la falla $K = \gamma/H = 0.5$.

Los cálculos se muestran en la tabla 3.1. Para esta margen, se

necesitaron 1.3 m de desgaste del fondo para llevarla a la falla. De la ec 3.17 el ancho del bloque de falla resultó $BW = 1.06$ m y de la ec 3.18 el volumen del material que falló fué $VB = 2.59$ m³ por metro de longitud del río. Se puede ver en la tabla que el tamaño del incremento de erosión del fondo se redujo a medida que se acercaba a la falla del talud, para definir mejor la altura crítica.

Tabla 3.1 Cálculo de estabilidad de la orilla

| ΔZ (m) | H (m) | H' (m) | $(H/H')_m$ (m) | β (°) | λ_1 | λ_2 | λ_3 | $(H/H')_c$ (m) |
|-------------------|----------|-----------|-------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| 0.000 | 1.500 | 1.50 | 1.000 | 41.88 | 0.3217 | 0.5740 | -0.0678 | 1.895 |
| 0.172 | 1.672 | 1.50 | 1.115 | 43.14 | 0.3252 | 0.5740 | -0.0716 | 1.882 |
| 0.160 | 1.832 | 1.50 | 1.221 | 44.02 | 0.3272 | 0.5740 | -0.0743 | 1.875 |
| 0.147 | 1.979 | 1.50 | 1.319 | 44.65 | 0.3284 | 0.5740 | -0.0763 | 1.872 |
| 0.136 | 2.115 | 1.50 | 1.410 | 45.13 | 0.3292 | 0.5740 | -0.0777 | 1.870 |
| 0.129 | 2.244 | 1.50 | 1.496 | 45.50 | 0.3297 | 0.5740 | -0.0789 | 1.869 |
| 0.120 | 2.364 | 1.50 | 1.576 | 45.80 | 0.3301 | 0.5740 | -0.0798 | 1.868 |
| 0.109 | 2.473 | 1.50 | 1.649 | 46.03 | 0.3304 | 0.5740 | -0.0805 | 1.868 |
| 0.101 | 2.574 | 1.50 | 1.716 | 46.22 | 0.3306 | 0.5740 | -0.0811 | 1.868 |
| 0.090 | 2.664 | 1.50 | 1.776 | 46.37 | 0.3307 | 0.5740 | -0.0816 | 1.867 |
| 0.090 | 2.754 | 1.50 | 1.836 | 46.51 | 0.3309 | 0.5740 | -0.0820 | 1.867 |
| 0.047 | 2.801 | 1.50 | 1.867 | 46.57 | 0.3309 | 0.5740 | -0.0822 | 1.867 |

4. METODOLOGIA DE CALCULO.

4.1 PROGRAMAS DE CALCULO DE FALLA DE TALUD.

Aplicando las ecuaciones desarrolladas en el cap 3 se hicieron dos programas en lenguaje FORTRAN 77. En general ambos programas utilizan los siguientes parámetros en el cálculo, erosión del fondo ΔZ ; erosión marginal ΔW ; propiedades físicas del material c' , ϕ' y γ_s ; factor de seguridad FS; profundidad de la grieta de tensión $y = K H$; ángulo de inclinación de la orilla i ; altura inicial de la orilla H_0 ; altura de la margen sobre el fondo del cauce H y la altura sobre el punto B, H' , (fig 3.1b).

El programa FALLAI calcula la altura de la orilla para la cual se presenta la falla inicial del talud, comparando para cada intervalo de tiempo la relación física $(H/H')_m$ con la relación calculada $(H/H')_c$ que se obtiene al resolver la ec 3.12.

Si la relación $(H/H')_m$ es menor que $(H/H')_c$ el talud es estable y H no es la altura crítica, por lo que se calculan los nuevos valores de H y H' en función de la erosión lateral y de la erosión marginal y se calculan las nuevas relaciones $(H/H')_m$ y $(H/H')_c$ y el nuevo ángulo de falla β , ya que este depende de la relación $(H/H')_m$.

Si las relaciones son aproximadamente iguales, entonces H es la altura crítica del talud y se utilizan las ecs 3.17 y 3.18 para calcular el

ancho del bloque de falla y el volumen del bloque por unidad de longitud del canal.

Si $(H/H')_m$ es mayor que $(H/H')_c$ entonces la margen es inestable y la falla ya se presentó.

El programa FALLAP determina la altura crítica del talud para que se presente la falla paralela. En este caso el ángulo de falla β permanece constante. La relación física $(H/H')_m$ se calcula de la misma manera que la falla anterior, pero ahora se compara con la relación $(H/H')_c$ que resulta de resolver la ec 3.27a. El ancho y el volumen del bloque de falla se obtiene con las ecs 3.28 y 3.29 respectivamente.

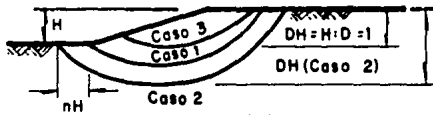
Los listados de los programas y sus instructivos de uso se pueden ver en el Apéndice al final de este trabajo.

4.2 GENERACION Y DISCUSION DE GRAFICAS PARA EL CALCULO DE ESTABILIDAD DE TALUD.

Utilizando el programa FALLAI, se trató de determinar la influencia de cada variable en los resultados; se pensó en hacer corridas donde se variaran algunos parámetros y otros permanecieran constantes, pero debido a que resultaron demasiadas combinaciones posibles se buscó la forma de agrupar algunas variables para obtener términos adimensionales.

Taylor[1948] construyó una gráfica, fig 4.1, para detrmnar la altura crítica de un talud usando el parámetro adimensional $NT = c/(\gamma_s H)$, considerando el ángulo de inclinación de la orilla i y el ángulo de fricción interna ϕ . Con el valor de NT y conocidos la cohesión c y el peso específico del material γ_s , se obtiene el valor de la altura H para la cual se presenta la falla al pie del talud. Tomando en cuenta esto, se hicieron calculos con el programa FALLAI para las siguientes combinaciones de datos :

| | Margen I | Margen II |
|------------|-----------------------|-----------------------|
| i | 60° | 60° |
| FS | 1 | 1 |
| ϕ' | 10° | 10° |
| K | 0.5 | 0.5 |
| γ_s | 1500 kg/m^3 | 1900 kg/m^3 |
| c' | 800 kg/m^2 | 1200 kg/m^2 |



(B)

Sección transversal típica, mostrando varios casos considerados en la zona B

CASO 1 Este es el caso más peligroso de los círculos de falla cuando pasa por el pie del talud. Está representado por líneas llenas en la gráfica

CASO 2 El círculo de falla pasa debajo del pie del talud. Está representado por líneas punteadas largas

CASO 3 Estrato de material firme a la altura del pie del talud ($D=1$), representado por líneas punteadas cortas

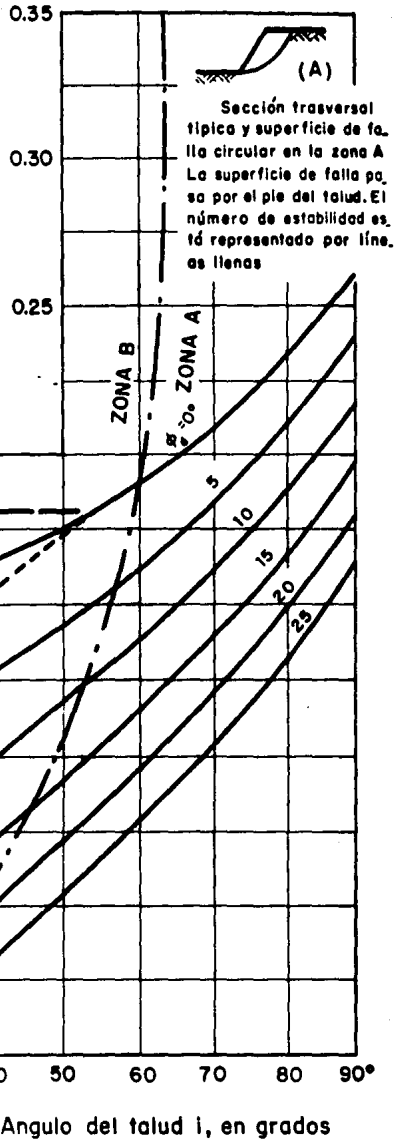


Fig 4.1 Carta de Taylor de números de estabilidad

Es decir todos los valores constantes excepto γ_s y c' . Para estos grupos de datos se hicieron diferentes corridas variando la altura inicial $H_0 = \{0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 \text{ m, etc.}\}$ encontrándose para cada caso su altura crítica, H . Posteriormente y siguiendo la teoría de Taylor[1948] se calcularon las relaciones adimensionales $NT = c/(\gamma_s H)$ y H'/H , donde H' es la altura inicial de la orilla al pie del talud, (como no se consideró la erosión marginal, H' permanece constante e igual a H_0 durante todo el tiempo). Una vez determinadas estas relaciones se graficaron y se vió que a pesar de que se tenían diferentes valores de c y de γ_s los puntos quedaban exactamente en la misma curva, fig 4.2.

Para determinar la influencia de la variable K se hicieron las mismas corridas, pero ahora para el valor de $K = 0$. Se calcularon las relaciones NT y H'/H y se graficaron los puntos obtenidos. En la fig 4.3 se ve que resultaron dos curvas distintas, una para $K = 0$ y otra para $K = 0.5$. Por otro lado, el método desarrollado en este trabajo es para taludes con $i > 60^\circ$ por lo que se trabajó con ángulos entre 60° y 90° .

Por lo que respecta al ángulo ϕ , en la gráfica de Taylor[1948] fig 4.1, el autor define el intervalo de valores que puede tomar ϕ de 0° a 25° en términos de esfuerzos totales. Cabe aclarar que Osman y Thorne[1988] señalan que los materiales cohesivos generalmente tienen un ángulo ϕ' menor de 40° pero empleando la teoría de los esfuerzos efectivos. No importa con que criterio se trabaje siempre y cuando haya consistencia, es decir, si se trabaja con esfuerzos totales se debe usar $\gamma_s = \gamma_{\text{natural}}$, y si es con esfuerzos efectivos $\gamma_s = \gamma_{\text{natural}} - \gamma_o$.

Finalmente, después de haber estudiado la influencia de estas variables, se decidió hacer las corridas y generar gráficas NT contra H'/H para $K = 0$ y 0.5 , para diferentes ángulos $\phi' = 0, 5, 10, 15, 20$ y 25° y también para $i = 60, 75$ y 90° . Con un factor de seguridad $FS = 1$. Para cada corrida se utilizó una altura inicial H_0 y además se trató de encontrar la altura inicial para la cual el talud se hallaba en la condición crítica, es decir, cuando $H'/H = 1$. Se aclara que por ser adimensionales las curvas son generales y válidas para cualquier combinación de c y de γ_s .

En la tabla 4.1 se resumen las corridas para $i = 60^\circ$ y $K = 0$; en la fig 4.4 se grafican estos resultados. Se usaron $c' = 1200 \text{ kg/m}^2$ y $\gamma_s = 1900 \text{ kg/m}^3$, aunque como se vió antes estos valores no afectan los resultados.

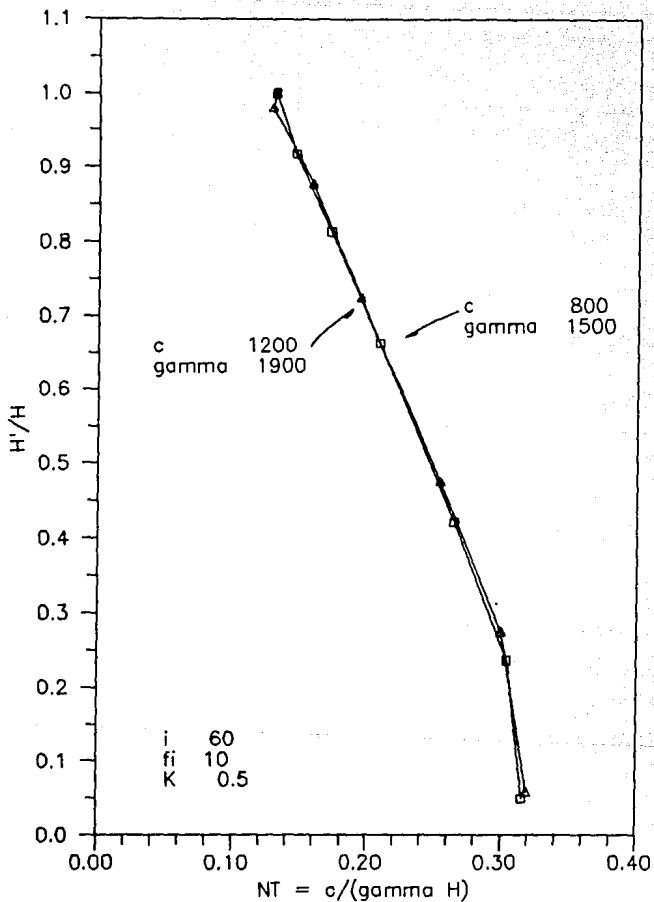


Fig 4.2 Variación de NT con respecto a c y gamma

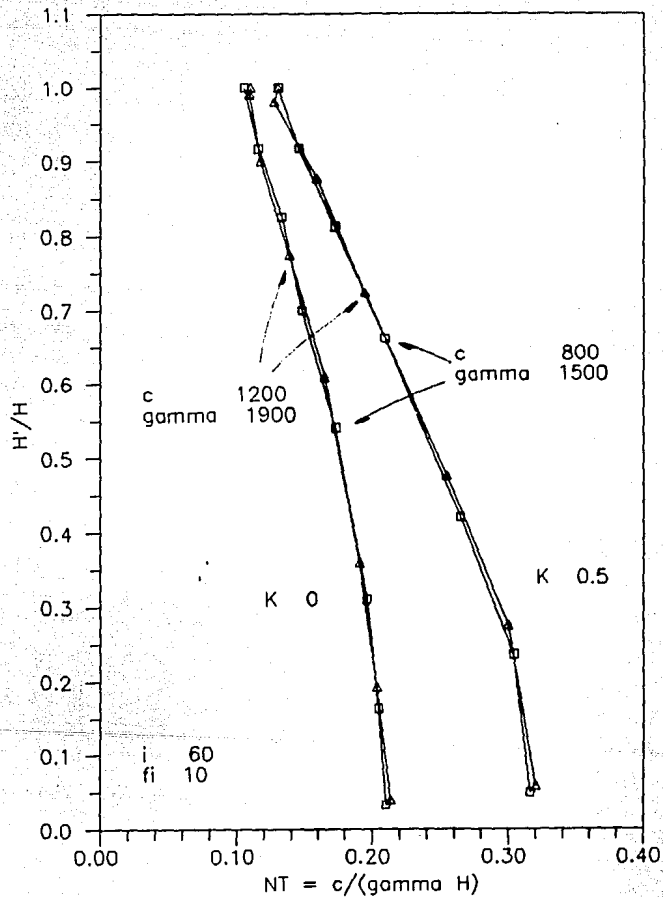


Fig 4.3 Variación de NT con respecto a K

Tabla 4.1 RESUMEN DE CORRIDAS K=0 l=60

| f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT | f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0.100 | 2.530 | 0.100 | 0.040 | 0.250 | 15 | 0.100 | 3.290 | 0.100 | 0.030 | 0.192 |
| | 0.300 | 2.550 | 0.300 | 0.118 | 0.248 | | 0.300 | 3.310 | 0.300 | 0.091 | 0.191 |
| | 0.500 | 2.580 | 0.500 | 0.194 | 0.245 | | 0.500 | 3.350 | 0.500 | 0.149 | 0.189 |
| | 1.000 | 2.730 | 1.000 | 0.366 | 0.231 | | 1.000 | 3.500 | 1.000 | 0.286 | 0.180 |
| | 2.000 | 3.170 | 2.000 | 0.631 | 0.199 | | 2.000 | 3.990 | 2.000 | 0.501 | 0.158 |
| | 3.000 | 3.680 | 3.000 | 0.815 | 0.172 | | 3.000 | 4.580 | 3.000 | 0.655 | 0.138 |
| | 4.000 | 4.180 | 4.000 | 0.957 | 0.151 | | 4.000 | 5.210 | 4.000 | 0.768 | 0.121 |
| | 4.380 | 4.380 | 4.380 | 1.000 | 0.144 | | 5.000 | 5.830 | 5.000 | 0.858 | 0.108 |
| | | | | | | | 6.000 | 6.460 | 6.000 | 0.929 | 0.098 |
| | | | | | | | 7.000 | 7.080 | 7.000 | 0.989 | 0.089 |
| | | | | | | | 7.200 | 7.200 | 7.200 | 1.000 | 0.088 |
| f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT | f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT |
| 5 | 0.100 | 2.760 | 0.100 | 0.036 | 0.229 | 20 | 0.100 | 3.610 | 0.100 | 0.028 | 0.175 |
| | 0.300 | 2.780 | 0.300 | 0.108 | 0.227 | | 0.300 | 3.630 | 0.300 | 0.083 | 0.174 |
| | 0.500 | 2.810 | 0.500 | 0.178 | 0.225 | | 0.500 | 3.660 | 0.500 | 0.137 | 0.173 |
| | 1.000 | 2.960 | 1.000 | 0.338 | 0.213 | | 1.000 | 3.820 | 1.000 | 0.262 | 0.165 |
| | 2.000 | 3.420 | 2.000 | 0.585 | 0.185 | | 2.000 | 4.320 | 2.000 | 0.463 | 0.146 |
| | 3.000 | 3.950 | 3.000 | 0.759 | 0.160 | | 3.000 | 4.940 | 3.000 | 0.607 | 0.128 |
| | 4.000 | 4.500 | 4.000 | 0.889 | 0.140 | | 4.000 | 5.600 | 4.000 | 0.714 | 0.113 |
| | 5.000 | 5.050 | 5.000 | 0.990 | 0.125 | | 5.000 | 6.270 | 5.000 | 0.797 | 0.101 |
| | 5.100 | 5.100 | 5.100 | 1.000 | 0.124 | | 6.000 | 6.950 | 6.000 | 0.863 | 0.091 |
| | | | | | | | 7.000 | 7.600 | 7.000 | 0.921 | 0.083 |
| | | | | | | | 8.000 | 8.270 | 8.000 | 0.967 | 0.076 |
| | | | | | | | 8.800 | 8.800 | 8.800 | 1.000 | 0.072 |
| f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT | f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT |
| 10 | 0.100 | 3.010 | 0.100 | 0.033 | 0.210 | 25 | 0.100 | 3.970 | 0.100 | 0.025 | 0.159 |
| | 0.300 | 3.030 | 0.300 | 0.099 | 0.208 | | 0.300 | 3.990 | 0.300 | 0.075 | 0.158 |
| | 0.500 | 3.070 | 0.500 | 0.163 | 0.206 | | 0.500 | 4.020 | 0.500 | 0.124 | 0.157 |
| | 1.000 | 3.220 | 1.000 | 0.311 | 0.196 | | 1.000 | 4.180 | 1.000 | 0.239 | 0.151 |
| | 2.000 | 3.690 | 2.000 | 0.542 | 0.171 | | 2.000 | 4.690 | 2.000 | 0.426 | 0.135 |
| | 3.000 | 4.260 | 3.000 | 0.704 | 0.148 | | 3.000 | 5.340 | 3.000 | 0.562 | 0.118 |
| | 4.000 | 4.840 | 4.000 | 0.826 | 0.130 | | 4.000 | 6.030 | 4.000 | 0.663 | 0.105 |
| | 5.000 | 5.430 | 5.000 | 0.921 | 0.116 | | 5.000 | 6.750 | 5.000 | 0.741 | 0.094 |
| | 6.000 | 6.010 | 6.000 | 0.998 | 0.105 | | 6.000 | 7.460 | 6.000 | 0.804 | 0.085 |
| | 6.030 | 6.030 | 6.030 | 1.000 | 0.105 | | 7.000 | 8.180 | 7.000 | 0.856 | 0.077 |
| | | | | | | | 8.000 | 8.880 | 8.000 | 0.901 | 0.071 |
| | | | | | | | 9.000 | 9.600 | 9.000 | 0.938 | 0.066 |
| | | | | | | | 10.00 | 10.30 | 10.00 | 0.971 | 0.061 |
| | | | | | | | 10.95 | 10.95 | 10.95 | 1.000 | 0.058 |

$$NT = (c/\gamma H)$$

Tabla 4.2 RESUMEN DE CORRIDAS K=0.5 i=60

| f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT | f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0.100 | 1.690 | 0.100 | 0.059 | 0.374 | 15 | 0.100 | 2.200 | 0.100 | 0.045 | 0.287 |
| | 0.300 | 1.720 | 0.300 | 0.174 | 0.367 | | 0.300 | 2.240 | 0.300 | 0.134 | 0.282 |
| | 0.500 | 1.790 | 0.500 | 0.279 | 0.353 | | 0.500 | 2.300 | 0.500 | 0.217 | 0.275 |
| | 1.000 | 2.030 | 1.000 | 0.493 | 0.311 | | 1.000 | 2.560 | 1.000 | 0.391 | 0.247 |
| | 2.000 | 2.610 | 2.000 | 0.766 | 0.242 | | 2.000 | 3.250 | 2.000 | 0.615 | 0.194 |
| | 3.000 | 3.190 | 3.000 | 0.940 | 0.198 | | 3.000 | 3.980 | 3.000 | 0.754 | 0.159 |
| | 3.420 | 3.420 | 3.420 | 1.000 | 0.185 | | 4.000 | 4.690 | 4.000 | 0.853 | 0.135 |
| | | | | | | | 5.000 | 5.400 | 5.000 | 0.926 | 0.117 |
| f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT | | 6.000 | 6.080 | 6.000 | 0.987 | 0.104 |
| | | | | | | | 6.250 | 6.250 | 6.250 | 1.000 | 0.101 |
| 5 | 0.100 | 1.840 | 0.100 | 0.054 | 0.343 | f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT |
| | 0.300 | 1.880 | 0.300 | 0.160 | 0.336 | | | | | | |
| | 0.500 | 1.940 | 0.500 | 0.258 | 0.326 | 20 | 0.100 | 2.410 | 0.100 | 0.041 | 0.262 |
| | 1.000 | 2.190 | 1.000 | 0.457 | 0.288 | | 0.300 | 2.450 | 0.300 | 0.122 | 0.258 |
| | 2.000 | 2.810 | 2.000 | 0.712 | 0.225 | | 0.500 | 2.510 | 0.500 | 0.199 | 0.252 |
| | 3.000 | 3.440 | 3.000 | 0.872 | 0.184 | | 1.000 | 2.780 | 1.000 | 0.360 | 0.227 |
| | 4.000 | 4.040 | 4.000 | 0.990 | 0.156 | | 2.000 | 3.500 | 2.000 | 0.571 | 0.180 |
| | 4.110 | 4.110 | 4.110 | 1.000 | 0.154 | | 3.000 | 4.270 | 3.000 | 0.703 | 0.148 |
| | | | | | | | 4.000 | 5.040 | 4.000 | 0.794 | 0.125 |
| f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT | | 5.000 | 5.800 | 5.000 | 0.862 | 0.109 |
| | | | | | | | 6.000 | 6.550 | 6.000 | 0.916 | 0.096 |
| 10 | 0.100 | 2.010 | 0.100 | 0.050 | 0.314 | | 7.000 | 7.280 | 7.000 | 0.962 | 0.087 |
| | 0.300 | 2.050 | 0.300 | 0.146 | 0.308 | | 8.000 | 8.010 | 8.000 | 0.999 | 0.079 |
| | 0.500 | 2.110 | 0.500 | 0.237 | 0.299 | | 8.050 | 8.050 | 8.050 | 1.000 | 0.078 |
| | 1.000 | 2.370 | 1.000 | 0.422 | 0.266 | f1 | Ho | H | H' | H'/H | NT |
| | 2.000 | 3.020 | 2.000 | 0.662 | 0.209 | | | | | | |
| | 3.000 | 3.700 | 3.000 | 0.811 | 0.171 | 25 | 0.100 | 2.650 | 0.100 | 0.038 | 0.238 |
| | 4.000 | 4.360 | 4.000 | 0.917 | 0.145 | | 0.300 | 2.680 | 0.300 | 0.112 | 0.236 |
| | 5.000 | 5.000 | 5.000 | 1.000 | 0.126 | | 0.500 | 2.750 | 0.500 | 0.182 | 0.230 |
| | | | | | | | 1.000 | 3.030 | 1.000 | 0.330 | 0.208 |
| | | | | | | | 2.000 | 3.770 | 2.000 | 0.531 | 0.168 |
| | | | | | | | 3.000 | 4.590 | 3.000 | 0.654 | 0.138 |
| | | | | | | | 4.000 | 5.420 | 4.000 | 0.738 | 0.117 |
| | | | | | | | 5.000 | 6.230 | 5.000 | 0.803 | 0.101 |
| | | | | | | | 6.000 | 7.040 | 6.000 | 0.852 | 0.090 |
| | | | | | | | 7.000 | 7.840 | 7.000 | 0.893 | 0.081 |
| | | | | | | | 8.000 | 8.620 | 8.000 | 0.928 | 0.073 |
| | | | | | | | 9.000 | 9.400 | 9.000 | 0.957 | 0.067 |
| | | | | | | | 10.00 | 10.18 | 10.00 | 0.982 | 0.062 |
| | | | | | | | 10.80 | 10.80 | 10.80 | 1.000 | 0.058 |

$$NT = (c/\gamma H)$$

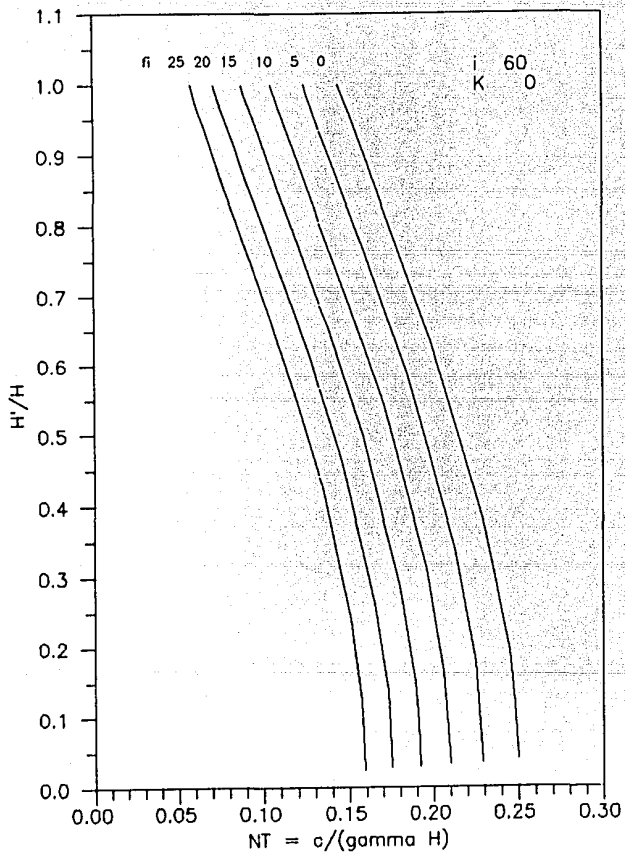


Fig 4.4 Gráfica para obtener
H para $i=60$ y $K=0$

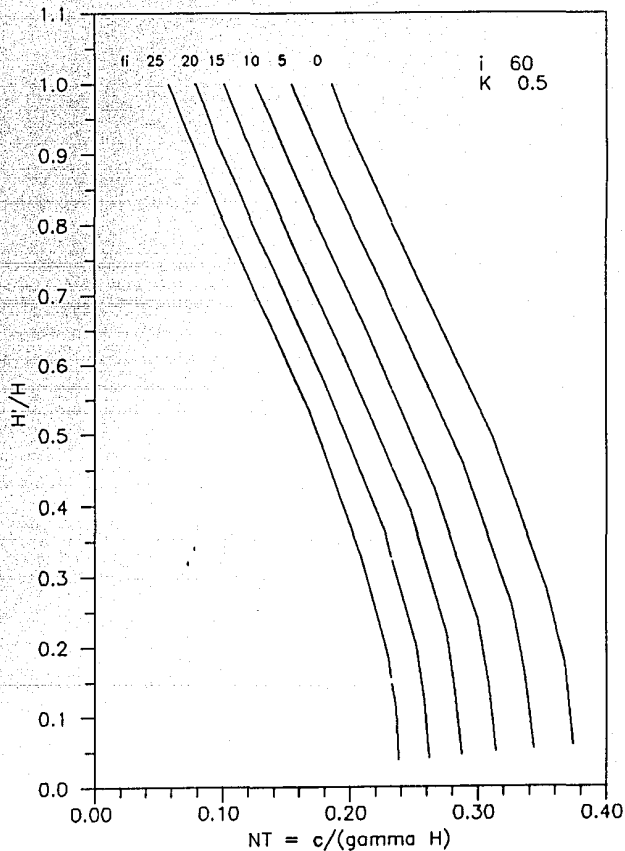


Fig 4.5 Gráfica para obtener
H para $i=60$ y $K=0.5$

En la tabla 4.2 y en la fig 4.5 se muestran las curvas para $i = 60^\circ$ y $K = 0.5$.

Se puede ver que, entre menor sea la altura H_0 , mayor tiene que ser la erosión total del fondo ΔZ , para que se presente la falla. Sin embargo, existe una altura H_0 para la cual, al incrementar sólo un poco ΔZ (por ejemplo, menos de 1 cm), se presenta la falla al pie del talud; esto se debe a que el talud se encuentra en la condición de estabilidad crítica. Las gráficas de las corridas para $i = 75^\circ$ y $K = 0$ se muestran en la fig 4.6 y las de $i = 75^\circ$ y $K = 0.5$ en la fig 4.7.

Para el caso especial $i = 90^\circ$ la altura crítica es constante e independiente de la altura inicial de la orilla. Si se analiza la ecuación general para el ángulo de falla β , ec 3.20, nótese que cuando i toma valores cercanos a 90° o cuando la relación H/H' es grande (H'/H pequeña) sin importar el ángulo i , el término

$$\left(\frac{H}{H'}\right)^2 (1-K^2) \tan i$$

también es grande, por lo tanto

$$\tan^{-1} \left[\left(\frac{H}{H'}\right)^2 (1-K^2) \tan i \right] \approx 90^\circ$$

por lo que finalmente

$$\beta = \frac{1}{2} (90 + \phi)$$

que es la ecuación con la que se calcula β cuando $i = 90^\circ$. Además, en la ec 3.13d se ve que $\lambda_3 = 0$, por lo que la ec 3.12 se reduce a

$$\lambda_1 \left(\frac{H}{H'}\right)^2 - \lambda_2 \left(\frac{H}{H'}\right) = 0$$

que también se puede escribir como

$$\frac{H}{H'} \left[\lambda_1 \left(\frac{H}{H'}\right) - \lambda_2 \right] = 0$$

cuyas raíces son

$$\left(\frac{H}{H'}\right)_1 = 0 \quad \text{y} \quad \left(\frac{H}{H'}\right)_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

Si sustituimos en la segunda raíz los valores de λ_1 y λ_2 , ecs 3.13b y 3.13c para la falla inicial se tiene

$$\left(\frac{H}{H'}\right)_2 = \frac{2(1-K)(c/\gamma H')}{(1-K^2)(\sin \beta \cos \beta - \cos^2 \beta \tan \phi)}$$

Se puede ver que λ_1 está en función de β y como a su vez β depende de ϕ , ec 3.13e, λ_1 depende de ϕ . Además, como $\lambda_2 = f\left[\frac{c}{\gamma H'}\right]$, finalmente

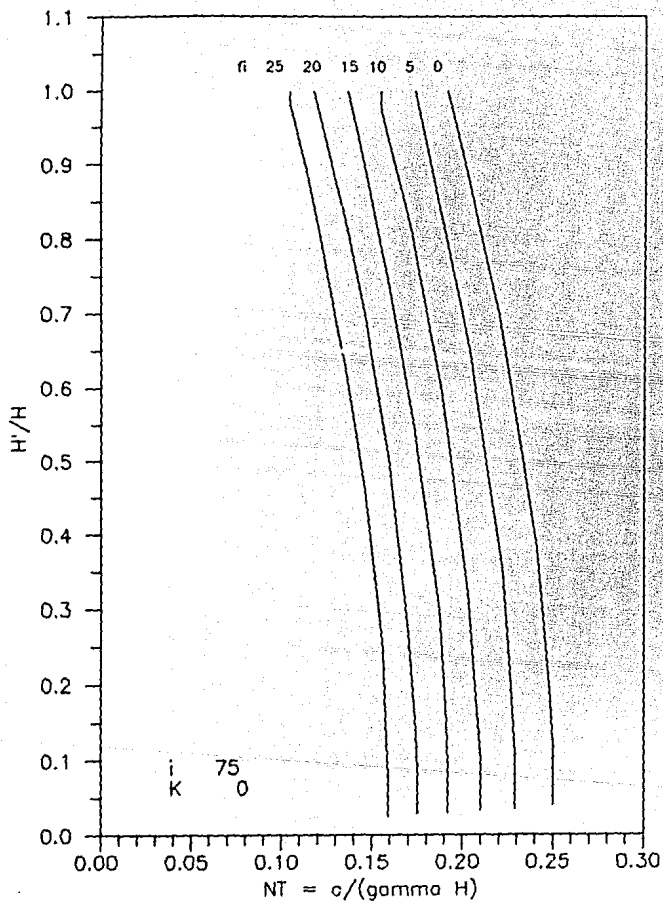


Fig 4.6 Gráfica para obtener
H para $i=75$ y $K=0$

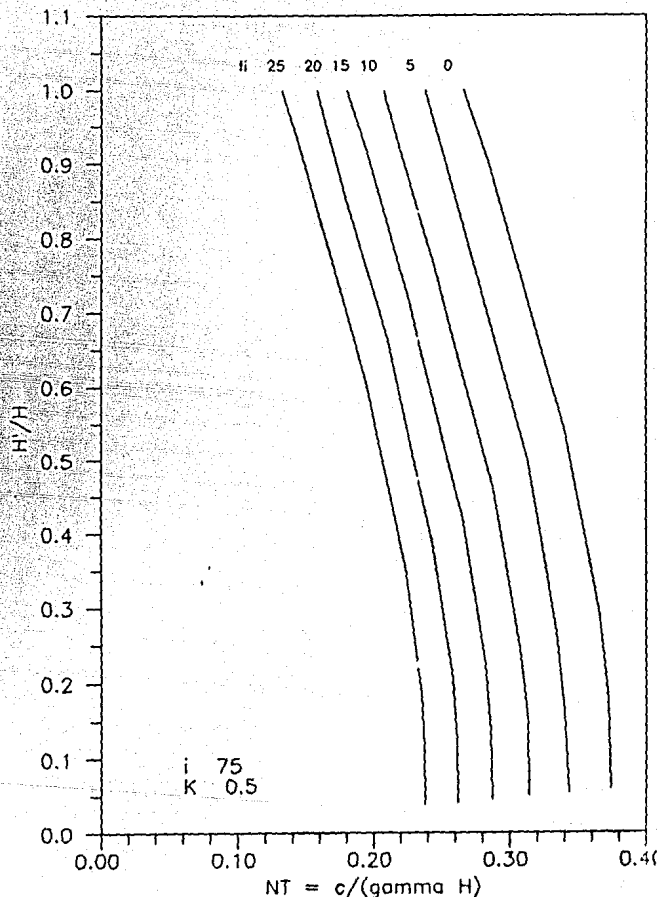


Fig 4.7 Gráfica para obtener
H para $i=75$ y $K=0.5$

$$\left[\frac{H}{H'} \right] = f \left[\frac{c}{\gamma H'} , \phi \right]$$

Esto quiere decir que para orillas verticales o cualquier talud con una relación H/H' grande (H'/H pequeña), el ángulo de falla y por consiguiente la altura crítica están en función sólo del ángulo de fricción interna ϕ . Para ilustrar esto en la fig 4.8 se muestran las curvas para $K = 0$, $\phi = 0^\circ$ y para $i = 60, 75$ y 90° , como se ve, para valores de la relación H'/H menores a 0.3 se puede considerar cualquier talud como uno de 90° dado que todas las curvas tienden a un mismo valor de NT.

La relación H'/H puede tomar valores pequeños cuando :

1. H aumenta y H' permanece constante (erosión de fondo sin erosión lateral), fig 4.9a
2. H aumenta y H' disminuye (erosión de fondo y erosión lateral simultáneas), fig 4.9b
3. H permanece constante y H' disminuye (erosión lateral sin erosión de fondo), fig 4.9c.

EJEMPLO

Para mostrar el uso de las gráficas, se resolverá el siguiente problema. Se desea determinar la altura crítica para una orilla con las siguientes características :

$$\begin{array}{ll} c' = 1300 \text{ kg/m}^2 & H_0 = 1.5 \text{ m} \\ \gamma_s = 1510 \text{ kg/m}^3 & K = 0.5 \\ \phi' = 7^\circ & i = 75^\circ \end{array}$$

Se utiliza la gráfica para $i = 75^\circ$ y $K = 0.5$ (fig 4.7) y se supone que no existe erosión marginal ($H' = \text{cte}$). El procedimiento es el siguiente, se asigna un valor inicial a la relación H'/H , por ejemplo 1.0; se entra a la gráfica con este valor, se corta la curva del ángulo ϕ correspondiente y se obtiene el valor de la relación NT. De esta relación se despeja el nuevo valor de H , se calcula el valor de H'/H y se vuelve a entrar a la gráfica, hasta que la altura H_i sea igual a la altura H_{i-1} . En la tabla 4.3 se muestra el cálculo de la altura crítica H . De la tabla se ve que para que se presente la falla se necesita que ocurra una erosión total del fondo de 1.37 m, y así se alcance la altura crítica $H = 2.87$ m.

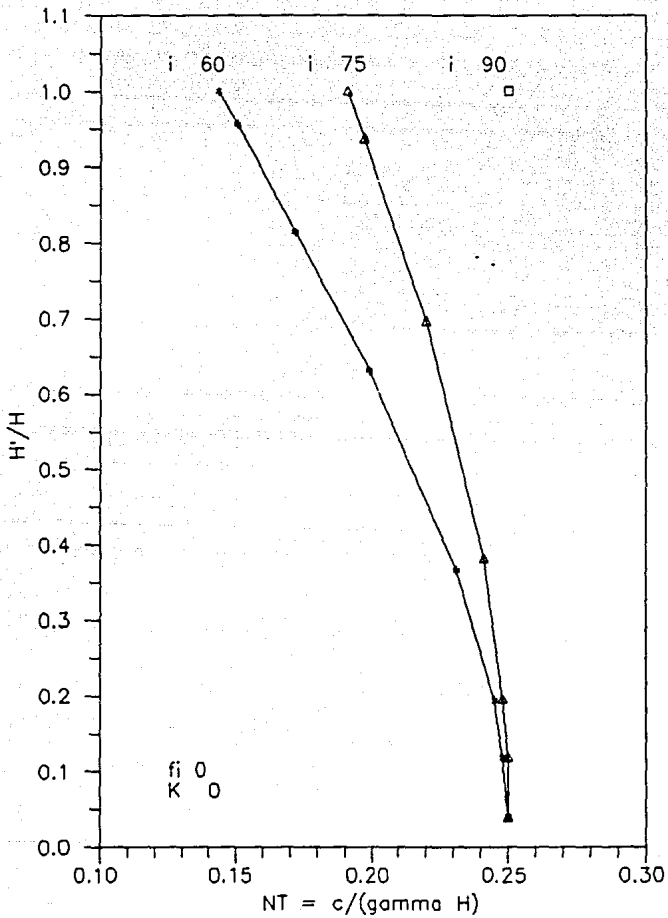
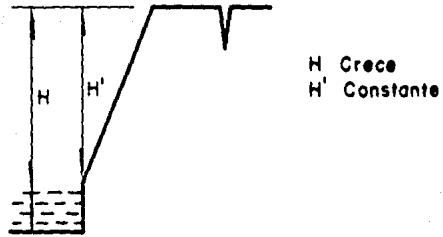
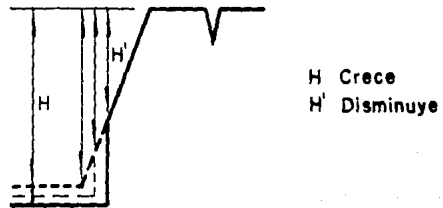


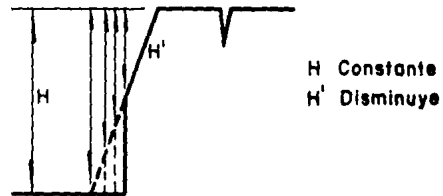
Fig 4.8 Variación de NT con respecto a i



a) Erosión de fondo



b) Erosión de fondo y erosión marginal simultáneas



c) Erosión marginal

Fig 4.9 Formas de erosión

Tabla 4.3 Cálculo de la altura crítica H, utilizando las gráficas

| $\frac{H'}{H}$ | $NT = c/(\gamma_s H)$ | $\frac{H}{H_0}$ |
|----------------|-----------------------|-----------------|
| 1.00 | 0.23 | 3.74 |
| 0.40 | 0.31 | 2.78 |
| 0.54 | 0.30 | 2.87 |
| 0.52 | 0.30 | 2.87 |

4.3 CALCULO SIMULTANEO DE EROSION Y FALLA DE TALUD.

Para resolver este problema, se necesita calcular simultáneamente el movimiento del fondo de un río con el cálculo de la estabilidad de la orilla para cualquier condición de erosión de fondo o de erosión marginal.

Para modelar el movimiento del fondo se requieren en general cinco ecuaciones que son la de continuidad del líquido, la de cantidad de movimiento, la de continuidad del sedimento, una ecuación de transporte de sedimentos y otra para la resistencia al flujo. En Berezowsky y Jiménez[1989] se puede ver un modelo de este tipo.

Thorne y Osman[1988] sugieren acoplar el cálculo del movimiento del fondo con el de la falla de talud de la siguiente forma :

1. Además de los datos necesarios para el modelo de fondo móvil, como gasto; anchos de la secciones; tamaños característicos del material del fondo; etc, se necesitan propiedades del suelo, como peso específico γ_s ; cohesión efectiva c' ; ángulo de fricción interna efectivo ϕ' ; tasa de adsorción de sodio SAR; dispersión dieléctrica $\Delta\epsilon$; concentración de sales en el agua de los poros del suelo CONC; y también la geometría de la orilla, la altura inicial H_0 y el ángulo de inclinación α
2. Se selecciona un valor para el factor de seguridad FS y se calculan los nuevos valores de c y de ϕ con las ecs 3.10a y 3.10b
3. Se calcula la estabilidad de la orilla con estas condiciones iniciales con los pasos 4-6 de la secuencia de cálculo del cap 3 para determinar si se está usando un valor adecuado del factor de seguridad
4. Se utilizan las figs 2.5 y 2.6 para determinar el esfuerzo cortante crítico que resiste la orilla τ_c
5. Se calcula el tirante d , la pendiente de energía S y el esfuerzo cortante producido por el flujo τ , en cada sección, con el modelo de fondo móvil

6. Se calcula la tasa de erosión lateral R, ec 2.2

7. Se encuentra la distancia de erosión lateral ΔW . Con este valor se obtiene el volumen del material en la orilla que se erosiona por unidad de longitud del canal VL, y la altura H' con

$$VL = \Delta W d$$
$$H'^{t+\Delta t} = H'^t - \Delta W \tan \alpha$$

8. Se calcula el nuevo ancho en cada sección

$$W'^{t+\Delta t} = W'^t + \Delta W$$

9. Se calcula el gasto sólido G_s , en cada sección usando la formulación que se haya escogido en el modelo de fondo móvil

10. Se encuentra el volumen del material G_b , que es erosionado del fondo del río de

$$G_b = G_s - (VL \text{ ARENA} / \Delta t)$$

donde ARENA es un factor que representa el porcentaje de arena que contiene el material de la orilla, ya que se considera que sólo el material arenoso influye en el proceso de erosión del fondo

11. Utilizando el modelo de fondo móvil se calcula el nuevo perfil del fondo y se obtiene un valor de ΔZ para cada sección y la nueva altura de la orilla con

$$\Delta Z = Z^t - Z'^{t+\Delta t}$$
$$H'^{t+\Delta t} = H'^t + \Delta Z$$

12. Se determina la estabilidad de la orilla usando las ecs 3.16 o 3.27a dependiendo del tipo de falla. Si es estable ir al paso 17

13. Si no es estable, se calcula el ancho del bloque de falla BW, el volumen del material que falló VB, y el nuevo ángulo de la orilla $\alpha = \beta$, (ecs 3.17 y 3.18 o 3.28 y 3.29), dependiendo del tipo de falla.

14. Se calcula el tiempo necesario por el flujo para remover el material fallado; de igual manera que en el paso 10, se debe determinar la fracción del volumen de falla VB que es arrastrado, multiplicándolo por el factor ARENA

$$TR = \frac{VB \text{ ARENA}}{G_b}$$

donde

TR tiempo de remoción

15. Si TR es mayor que Δt , entonces para el siguiente intervalo de tiempo, se supone que no hay erosión de fondo y que la capacidad de transporte del flujo es satisfecha por el material de la orilla que falló

16. Si TR es menor que Δt , entonces para el siguiente intervalo, la erosión del fondo sólo actúa durante el periodo de tiempo $(\Delta t - TR)$, es decir después de que el material del talud que falló ha sido totalmente removido

17. Se incrementa el tiempo un Δt y se repite el procedimiento desde el paso 6

En esta metodología, Thorne y Osman[1988] suponen (pasos 10, 14 a 16) que el río transporta en forma instantánea lo más que puede del material erosionado o que falló. El proceso en realidad es bastante complejo ya que interactúa el flujo y el movimiento del fondo. En el cap 5 se muestran cálculos del tiempo en que el río absorbe un caído.

5. APLICACIONES.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

El sistema de ríos del bajo Grijalva ha sufrido modificaciones en los últimos años debido, principalmente, a la construcción del sistema de presas Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas, las cuales son de gran importancia para la generación de energía eléctrica y el control de inundaciones.

En la actualidad no se puede predecir exactamente el estado final al que llegará el río, ya que cuando se inició la operación de la presa Peñitas, la última construida, el río se encontraba tal vez al final del proceso de ajuste morfológico debido al efecto regulador de la presa Malpaso y de las modificaciones que se hicieron en el río aguas abajo del puente Mezcalapa-Samaria (como el dragado de un cauce para navegación, apertura de un cauce piloto y los bordos longitudinales).

Desde hace años se ha detectado en el río Mezcalapa-Samaria, que es el nombre que recibe el río Grijalva en esta zona, una tendencia a que se formen barras e islotes y que aumente la relación ancho-tirante, principalmente por erosión de las márgenes. Dada por un lado, la demanda de suelo en la zona, y por el otro, a que en sí mismo el suelo de la planicie tiene un gran valor, tanto para la agricultura como para la ganadería, y que además existen pequeños poblados cercanos a las márgenes del río, la pérdida de suelo por erosión marginal genera además de un

problema económico, un problema social. Este trabajo es parte de un estudio de largo plazo del río en que se intentan definir las medidas que permitan, por un lado, el control de la erosión marginal, y por el otro, el manejo del río durante avenidas.

No se tomó en cuenta la erosión marginal en el cálculo de la altura crítica debido, por un lado, a que no se cuenta con levantamientos topográficos a detalle de las márgenes del río, por lo que no se conoce bien la configuración de la orilla, sobre todo bajo el nivel del agua, y por el otro, no se tienen datos de las propiedades electroquímicas del suelo, es decir la tasa de adsorción de sodio (SAR); la concentración de sales en el agua de los poros del suelo (CONC) y la dispersión dieléctrica ($\Delta\epsilon_0$); estas propiedades son necesarias para determinar el esfuerzo cortante crítico del suelo (τ_c) y con este la tasa de erosión del suelo.

5.2 REVISION DE TALUDES ACTUALES

La estabilidad de un talud se puede analizar tomando en cuenta efectos a corto y largo plazo. Si se consideran los efectos a corto plazo existen tres posibilidades :

a) trabajar con los parámetros resultantes de la prueba triaxial no consolidada no drenada (UU), c_{uu} y ϕ_{uu} , los cuales para un material totalmente saturado son $\phi_{uu} = 0$ y c_{uu} se toma como la resistencia al corte del suelo τ_f , es decir :

$$\tau_f = c_{uu} = \sigma_n \tan \phi + c = \sigma_n' \tan \phi' + c'$$

donde :

- τ_f resistencia al corte del suelo
- c_{uu} cohesión obtenida de la prueba triaxial no consolidada no drenada
- σ_n esfuerzo normal que resiste el suelo
- ϕ ángulo de fricción interna del suelo, en esfuerzos totales
- c cohesión del suelo, en términos de esfuerzos totales
- σ_n' esfuerzo normal efectivo, $\sigma_n' = \sigma_n - u$
- u presión de poro

b) usar los parámetros en esfuerzos totales, c y ϕ , obtenidos de la prueba consolidada no drenada (CU), es decir, siguiendo la ley

$$\tau_f = \sigma_n \tan \phi + c$$

c) usar los parámetros de esfuerzos efectivos usando pruebas CD. Esto requiere conocer la presión de poro dentro del suelo. Con este tipo de análisis se pueden estudiar los efectos que producen las variaciones en el nivel del río y en el nivel freático, por ejemplo, por vaciados o llenados rápidos, sin embargo esto implica un estudio más detallado y la utilización de redes de flujo, además de que las pruebas para la obtención de los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos son más elaboradas y costosas que las de esfuerzos totales.

Por otro lado, si el análisis se hace a largo plazo se deben usar los parámetros de resistencia expresados en esfuerzos efectivos, c' y ϕ' , prueba consolidada drenada (CD)

$$\tau_f = \sigma_n' \tan \phi' + c'$$

Al usar este enfoque también se deberá conocer la presión de poro dentro del suelo.

5.2.1 OBTENCION DE PARAMETROS DE RESISTENCIA PRELIMINARES

En visitas realizadas al río se determinó que la zona con problemas de erosión marginal es la que se encuentra entre el puente carretero, sección P (0+540), y la localidad de Huimanguillo, sección 3A (27+620), ver fig 5.1.

En general las márgenes del río están constituidas por arenas finas y por arcillas limosas de baja plasticidad, aunque en algunos lugares se pueden encontrar arcillas de alta plasticidad. La mayoría de las orillas tienen inclinaciones cercanas a la vertical y sus alturas varían desde unos centímetros hasta 5 m aproximadamente. En los hombros de los taludes se encontraron grietas, paralelas al río, probablemente debidas a contracciones y dilataciones sucesivas durante los ciclos de lluvia y sequía.

En la actualidad no se cuenta con valores de resistencia al corte del suelo, por lo que en una visita al río efectuada en julio de 1990, se obtuvieron cuatro muestras remoldeadas de material arcilloso de las orillas entre las secciones 1 (10+000) y la 3A (27+620), una muestra de arena de un talud en Huimanguillo y dos muestras de arena del fondo cerca de la localidad de Nueva Zelanda.

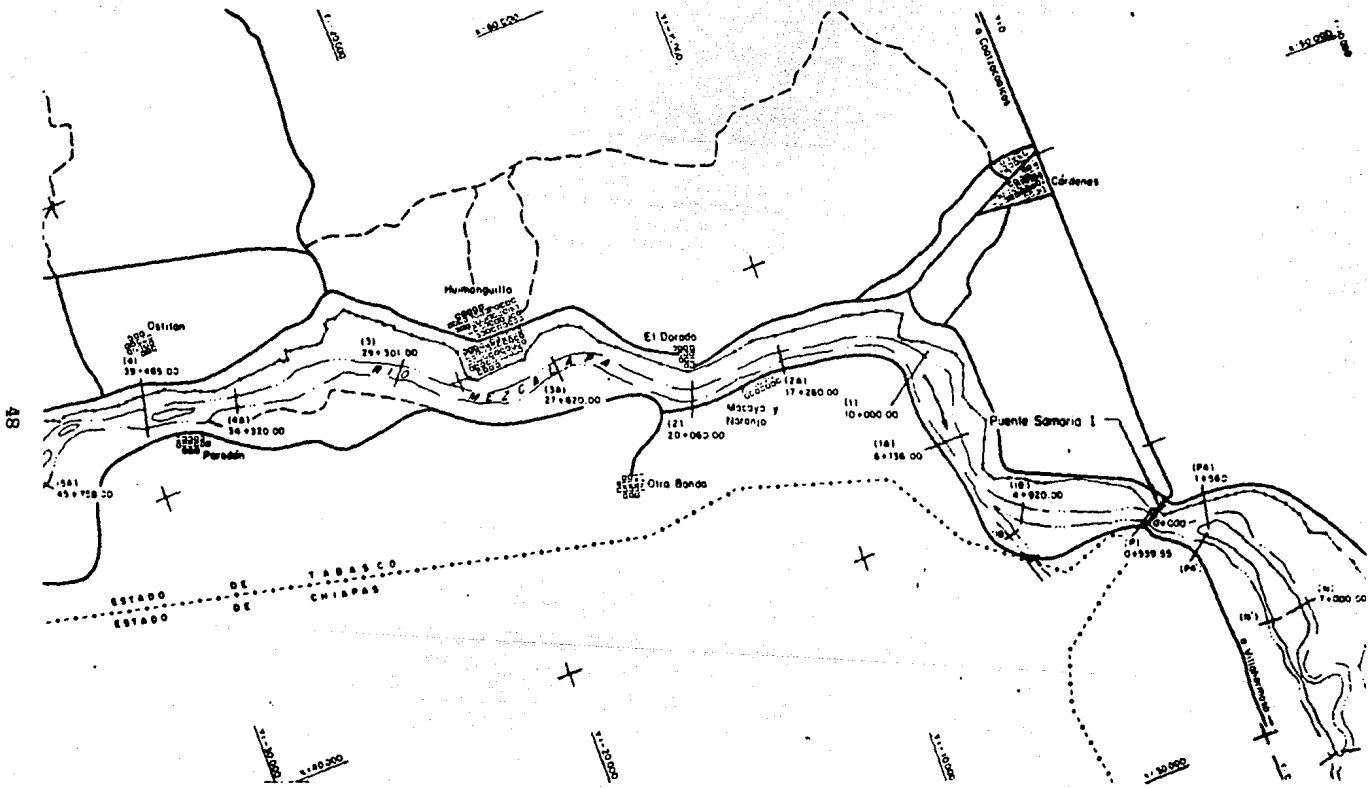


Fig 5.1 Ríó Mezcalapa - Samaria

Posteriormente, en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería se determinaron las granulometrías de las arenas. Los resultados se dan en la tabla 5.1. También se identificaron y clasificaron los materiales cohesivos y se determinaron en el laboratorio sus límites de consistencia, ver tabla 5.2.

Tabla 5.1 Clasificación de las arenas

| MUESTRA | CLASIFICACION SUCS | DESCRIPCION |
|---------|--------------------|-----------------------------|
| 1 y 2 | SP | arena mal graduada (fondo) |
| 5 | SP | arena mal graduada (orilla) |

Tabla 5.2 Límites de consistencia de los materiales cohesivos

| MUESTRA | LIMITE LIQUIDO % | LIMITE PLASTICO % | CONTENIDO HUMEDAD % | SUCS | DESCRIPCION |
|---------|------------------|-------------------|---------------------|------|---|
| 3 | 65.80 | 25.05 | 42.54 | CH | arcilla de alta plasticidad |
| 4 | 45.00 | 26.30 | 29.32 | OL | arcilla limosa orgánica de baja plasticidad |
| 6 | 72.00 | 34.00 | 31.81 | CH | arcilla de alta plasticidad |
| 7 | 38.80 | 31.34 | 39.82 | ML | limo arenoso |

Con los límites de consistencia se determinaron de una manera preliminar los valores de la resistencia no consolidada no drenada (c_{uu}) de los materiales de las márgenes a partir de correlaciones entre el índice de plasticidad ($IP = \text{límite líquido} - \text{límite plástico}$) y la relación (c_{uu}/σ_n'), fig 5.2, donde σ_n' es el esfuerzo vertical efectivo a la profundidad donde se obtuvo la muestra; estas correlaciones y las referencias de la figura se pueden ver en Holtz y Kovacs[1981].

De la fig 5.2 se tomaron como valores de la relación $c_{uu}/\sigma_n' = 0.6$ y 0.8 debido a que los índices de plasticidad variaban entre 7 y 40 % aproximadamente; se calculó el esfuerzo vertical efectivo para cada

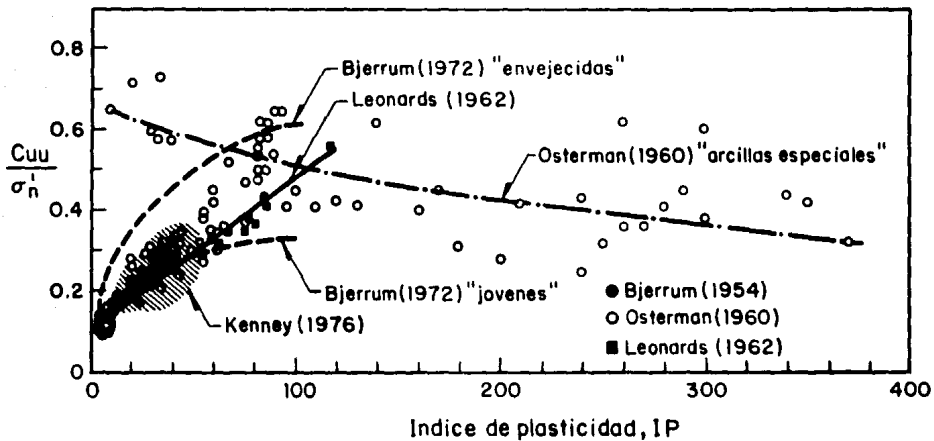


Fig 5.2 Relación entre $[C_{uu}/\sigma'_n]$ y el Índice de plasticidad para arcillas normalmente consolidadas

orilla σ_n' , con

$$\sigma_n' = \gamma_s d_1 + (\gamma_s - \gamma) d_2$$

donde:

d_1 distancia vertical del nivel freático al hombro del talud

d_2 distancia vertical del pie del talud al nivel freático

los resultados se pueden ver en la tabla 5.3, para $c_{uu}/\sigma_n' = 0.6$ y 0.8

Tabla 5.3 Valores de c_{uu}

| SECCION | MARGEN | $c_{uu}/\sigma_n' = 0.8$ | 0.6 |
|---------|-----------|--|--|
| | | c_{uu} (kg/m^2) | c_{uu} (kg/m^2) |
| P | izquierda | 1635 | 1245 |
| P | derecha | 1000 | 765 |
| 1B | izquierda | 2310 | 1760 |
| 1B | derecha | 1060 | 810 |
| 1A | izquierda | 1630 | 1240 |
| 1A | derecha | 1290 | 985 |
| 1 | izquierda | 1560 | 1190 |
| 1 | derecha | 1550 | 1185 |
| 2A | izquierda | 1560 | 1190 |
| 2A | derecha | 2010 | 1610 |
| 2 | izquierda | 1540 | 1175 |
| 2 | derecha | 1515 | 1155 |
| 3A | izquierda | 2075 | 1585 |
| 3A | derecha | 2335 | 1780 |
| 3 | izquierda | 1915 | 1460 |
| 3 | derecha | 1500 | 1140 |

Como se ve, el valor del esfuerzo normal efectivo está en función de la altura de cada talud, del tipo de material y de la profundidad del nivel freático.

Debido a que no se cuenta con valores reales de la resistencia del material, se tomaron estos valores preliminares para determinar la estabilidad de los taludes. Estos valores permiten tener una idea aunque sea cualitativa del probable comportamiento del río en la zona.

5.3 PREDICCIÓN DE FALLAS.

A partir de las secciones transversales obtenidas de un levantamiento realizado en el río, se determinó la geometría de las márgenes P (0+540), 1B (4+920), 1A (6+140), 1 (10+000), 2A (17+260), 2 (20+060), 3A (27+620) y 3 (29+301), que son las que presentan mayores problemas de erosión marginal.

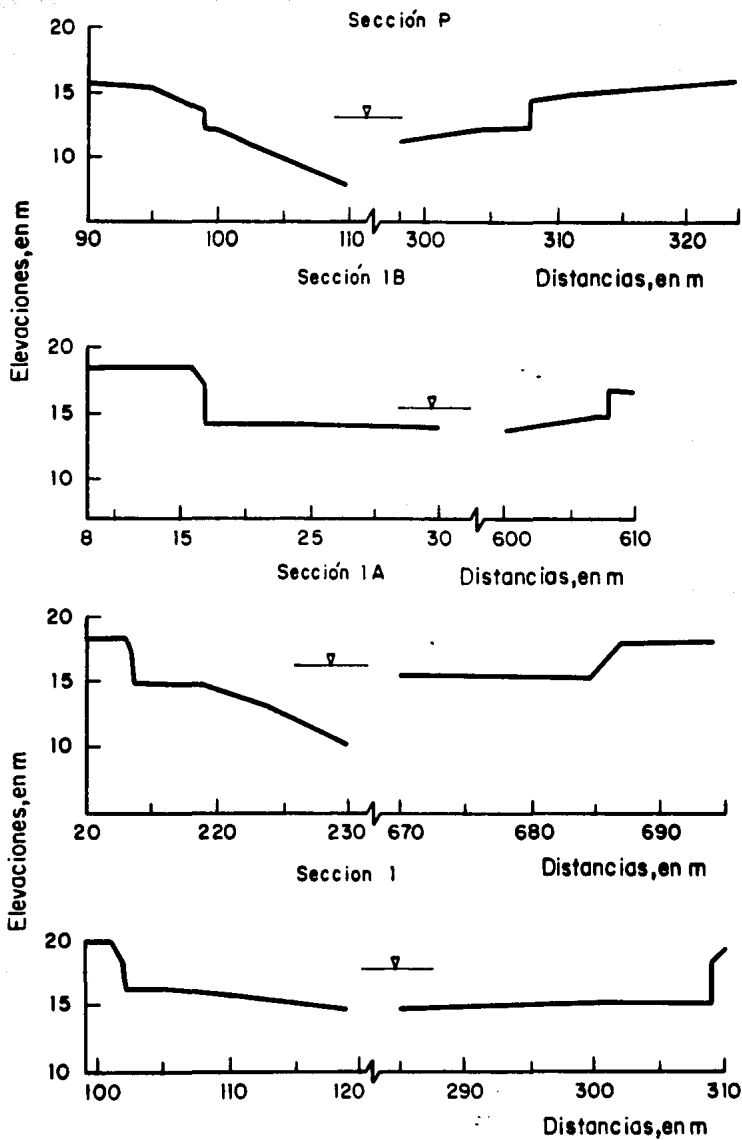


Fig 5.3a Márgenes de las secciones transversales P, 1B, 1A y 1

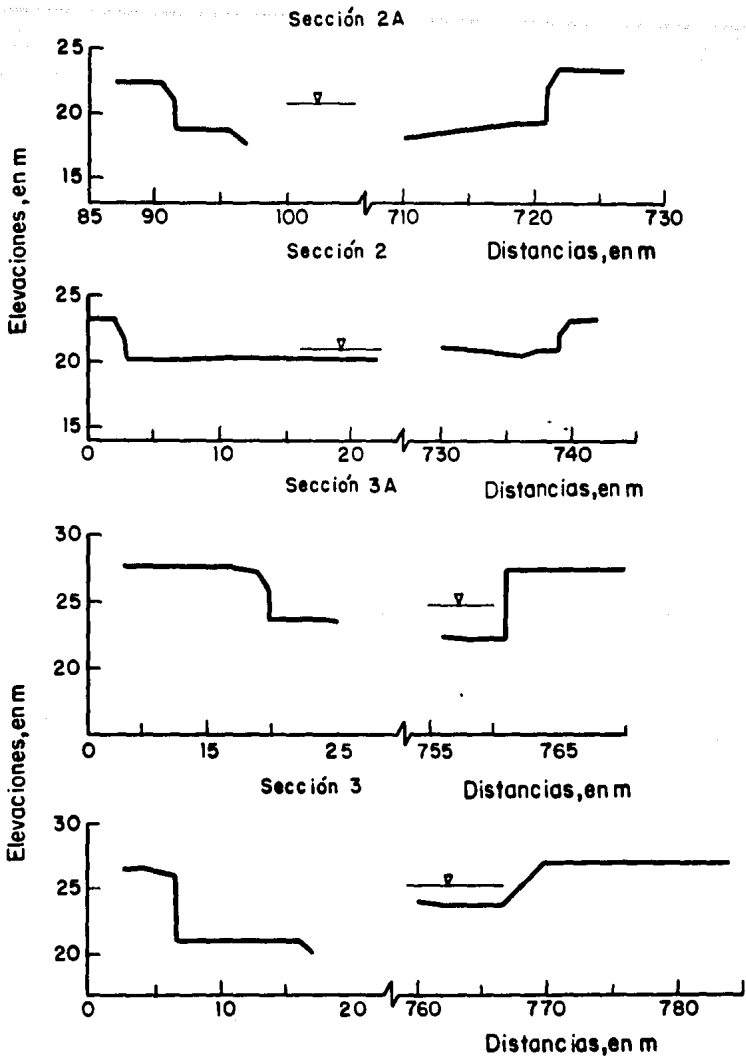


Fig 5.3b Márgenes de las secciones transversales 2A, 2, 3A y 3

Si se observan las márgenes de las secciones transversales, figs 5.3a y b, se puede ver que todas tienen un ángulo de inclinación cercano a 90°, excepto la 1A derecha y la 3D derecha, que tienen un ángulo de inclinación aproximadamente igual a 45°. Para las orillas verticales se supuso que seguirían el modelo de falla inicial de talud (subcap 3.1.1) y las de 45° el modelo de falla paralela (subcap 3.1.3), para así analizar los dos modelos de falla. Debido a que el método utilizado en este trabajo es aplicable sólo para taludes con $i > 60^\circ$, el resultado obtenido con los taludes con $i = 45^\circ$, se debe tomar con cierta reserva.

Dado que el único valor conocido de la resistencia del suelo era la resistencia c_{uu} se decidió analizar los taludes con la condición :

$$\phi = \phi_{uu} = 0^\circ$$

$$c = c_{uu}$$

que contempla el caso de un talud de material arcilloso totalmente saturado bajo condiciones no drenadas.

Se consideró que no existía grieta de tensión cerca del talud es decir $K = 0$, ya que no se conoce con exactitud la profundidad de esta, y también se supuso un valor de $\gamma_s = 1300 \text{ kgf/m}^3$. En la tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos utilizando la relación $c_{uu}/\sigma_n' = 0.6$ y en la tabla 5.5 para $c_{uu}/\sigma_n' = 0.8$ y la metodología de cálculo descrita en el subcap 3.1.4.

Tabla 5.4 Resultados para $c_{uu}/\sigma_n' = 0.6$

| SECCION | MARGEN | c_{uu} (kg/m^2) | H_0 (m) | H (m) | ΔZ (m) | BW (m) | BV (m^3/m) | TIPO DE FALLA |
|---------|--------|---------------------------------|--------------|----------|-------------------|-----------|---------------------------------|------------------|
| P | I | 1245 | 3.13 | 3.75 | 1.62 | 3.8 | 7.0 | inicial |
| P | D | 765 | 2.13 | 2.34 | 0.21 | 2.3 | 2.8 | inicial |
| 1B | I | 1760 | 4.33 | 5.43 | 1.10 | 5.4 | 14.7 | inicial |
| 1B | D | 810 | 2.07 | 2.49 | 0.42 | 2.5 | 3.1 | inicial |
| 1A | I | 1240 | 3.65 | 3.81 | 0.16 | 3.8 | 7.3 | inicial |
| 1A | D | 985 | 2.67 | 4.57 | 1.90 | 1.9 | 6.9 | paralela |
| 1 | I | 1190 | 3.63 | 3.65 | 0.02 | 3.7 | 6.7 | inicial |
| 1 | D | 1185 | 4.30 | (3.62) | | | | |
| 2A | I | 1190 | 3.78 | (3.66) | | | | |
| 2A | D | 1610 | 4.17 | 4.93 | 0.76 | 4.9 | 12.1 | inicial |
| 2 | I | 1175 | 2.97 | 3.60 | 0.63 | 3.6 | 6.5 | inicial |
| 2 | D | 1155 | 2.56 | 3.56 | 1.00 | 3.6 | 6.3 | inicial |
| 3A | I | 1585 | 3.89 | 4.89 | 1.00 | 4.9 | 12.0 | inicial |
| 3A | D | 1780 | 5.26 | 5.46 | 0.20 | 5.5 | 14.9 | inicial |
| 3 | I | 1460 | 5.68 | (3.50) | | | | |
| 3 | D | 1140 | 3.34 | 5.54 | 2.20 | 2.2 | 9.8 | paralela |

c_{uv} resistencia no consolidada no drenada del material del talud
H_o altura inicial del talud
H altura crítica
ΔZ erosión de fondo necesaria para que se presente la falla
BW ancho del bloque de falla
BV volumen del bloque de falla por unidad de longitud del río

Tabla 5.5 Resultados para $c_{uv}/\sigma_n' = 0.8$

| SECCION MARGEN | | c _{uv} (kg/m ²) | H _o (m) | H (m) | ΔZ (m) | BW (m) | BV (m ³ /m) | TIPO DE FALLA |
|----------------|---|---|-----------------------|----------|-----------|-----------|---------------------------|------------------|
| P | I | 1635 | 3.13 | 5.03 | 1.90 | 5.0 | 12.7 | inicial |
| P | D | 1000 | 2.13 | 3.07 | 0.94 | 3.1 | 4.7 | inicial |
| 1B | I | 2310 | 4.33 | 7.09 | 2.76 | 7.1 | 25.1 | inicial |
| 1B | D | 1060 | 2.07 | 3.27 | 1.20 | 3.3 | 5.4 | inicial |
| 1A | I | 1630 | 3.65 | 5.00 | 1.35 | 5.0 | 12.5 | inicial |
| 1A | D | 1290 | 2.67 | 5.30 | 2.63 | 2.6 | 10.5 | paralela |
| 1 | I | 1560 | 3.63 | 4.78 | 1.15 | 4.8 | 11.4 | inicial |
| 1 | D | 1550 | 4.30 | 4.75 | 0.45 | 4.8 | 11.3 | inicial |
| 2A | I | 1560 | 3.78 | 4.78 | 1.00 | 4.8 | 11.4 | inicial |
| 2A | D | 2010 | 4.17 | 6.47 | 2.30 | 6.5 | 20.9 | inicial |
| 2 | I | 1540 | 2.97 | 4.72 | 1.75 | 4.7 | 11.2 | inicial |
| 2 | D | 1515 | 2.56 | 4.63 | 2.07 | 4.6 | 10.7 | inicial |
| 3A | I | 2075 | 3.89 | 6.39 | 2.50 | 6.4 | 20.4 | inicial |
| 3A | D | 2335 | 5.26 | 7.16 | 1.90 | 7.2 | 25.6 | inicial |
| 3 | I | 1915 | 5.68 | 5.88 | 0.20 | 5.9 | 17.3 | inicial |
| 3 | D | 1500 | 3.34 | 6.35 | 3.01 | 3.0 | 14.6 | paralela |

Se puede ver en la tabla 5.4 que los taludes 1D, 2AI y 3I tienen una altura inicial mayor que la altura crítica lo cual no es posible; esto se debe a que los valores de c_{uv} son supuestos y pueden generar resultados que no tienen sentido físico. Si vemos estos mismos taludes en la tabla 5.5 para que fallen se necesita que ocurra una erosión de fondo de 0.45, 1.00 y 0.20 m respectivamente, esto muestra la importancia de una obtención confiable de los parámetros de resistencia del suelo, ya que como se ve a cambios pequeños en el valor de c_{uv} , corresponden variaciones grandes en la altura crítica.

5.4 CALCULO DEL TIEMPO EN QUE EL RIO ABSORBE EL MATERIAL DE UN CAIDO DE TALUD.

Para comparar el tiempo que tarda el río en arrastrar el material producto de una caída de talud, con el tiempo que suponen Thorne y Osman[1988] que tarda este proceso, se realizó este ejemplo con ayuda de un modelo matemático de fondo móvil que se describe en el subcap 4.3.

Según los resultados obtenidos en la calibración del modelo de fondo móvil, se observa que aproximadamente a los 3 años (1200 días), el río alcanza un equilibrio en el gasto sólido transportado ($G_s = 0.060 \text{ m}^3/\text{s}$). Al producirse un caído de talud, el volumen del bloque de falla rompe este equilibrio y modifica la capacidad de transporte del río.

Se supuso que se partía de condiciones de equilibrio como el mencionado arriba, y que se presentaba un caído de $32 \text{ m}^3/\text{m}$ a lo largo de 2500 m entre las secciones transversales del río, 12A y 1, el volumen del material caído fué $V = (32)(2500) = 80000 \text{ m}^3$ y además se supuso que la falla tardaba 3 días en suceder por lo que se obtuvo un gasto sólido por día

$$G_{\text{día}} = \frac{80000}{3(86400)} = 0.310 \text{ m}^3/\text{s}$$

que se introdujo como gasto sólido lateral entre las secciones 12A y 1.

Se hizo una corrida de 5 años con estas modificaciones y los resultados se pueden ver graficados en la fig 5.4; se tienen los valores de la evolución en el tiempo del gasto sólido en m^3/s en las secciones 2A1, 12A, 1 y 1A1, es decir dos secciones aguas arriba y dos aguas abajo de donde se introdujo el gasto sólido lateral.

En la fig 5.4 se ve el aumento que sufre el gasto sólido en la sección 1 y la disminución del mismo en las secciones 12A, 1A1 y 2A1, esto se debe a que al aumentar el volumen sólido a transportar en la sección 1, el río ajusta su capacidad de transporte, disminuyendo la cantidad de material que sale de las secciones 12A y de la 2A1, aguas arriba del punto donde se introdujo el gasto lateral, y de la sección 1A1, aguas abajo de la sección 1.

En la sección 1A1, al inicio del proceso el gasto sólido transportado disminuye debido a la gran cantidad de material proveniente de la sección 1, pero al disminuir el gasto sólido de la sección 1, el gasto de la sección 1A1 aumenta gradualmente y llega un momento (aproximadamente 60 días), en el que es más grande que el de la sección 1, el cual para entonces ha disminuido sustancialmente y casi ha llegado al valor que tenía inicialmente.

El tiempo en que el río absorbe el caído y vuelve a las condiciones

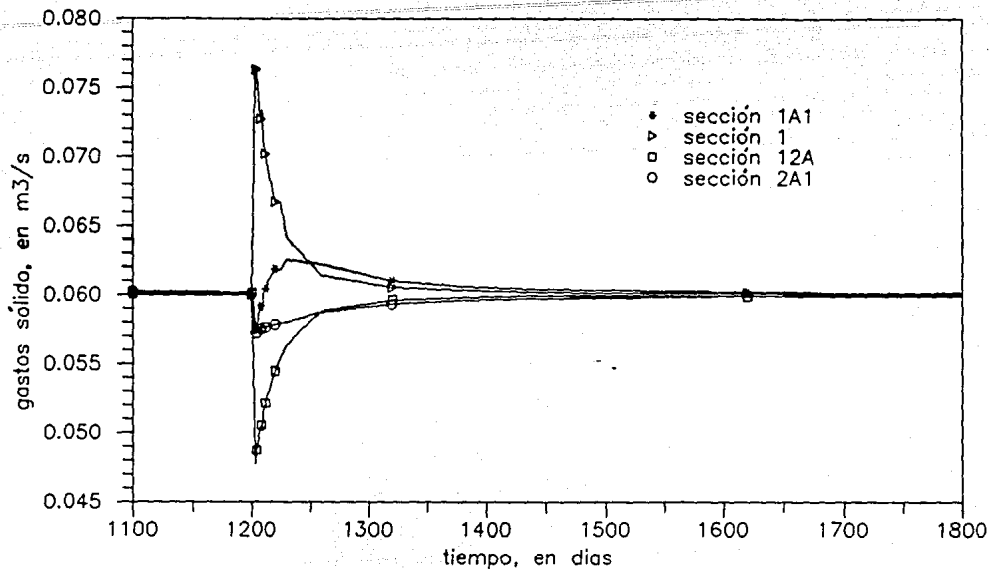


Fig 5.4 Variación del gasto sólido en el tiempo

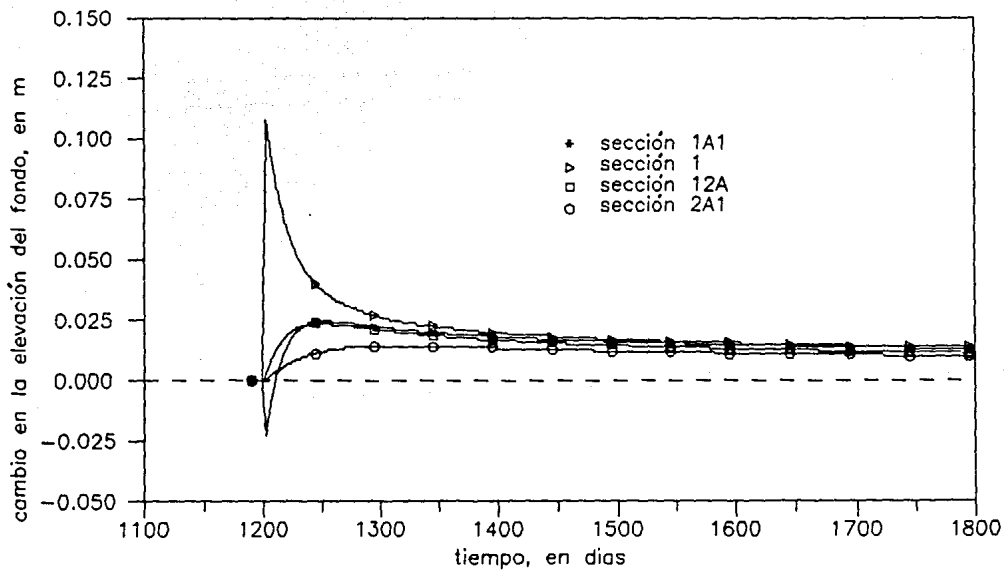


Fig 5.5 Variación de la elevación del fondo en el tiempo

iniciales, son aproximadamente 400 días, este resultado no concuerda con la suposición hecha por Thorne y Osman[1988] discutida en el cap 4, de que el río transporta en forma instantánea lo más que puede del material erosionado o que falló, sino que se trata de un proceso bastante más complejo.

En la fig 5.5 se ve el cambio que se produce en las elevaciones del fondo, para las secciones en estudio. En general la elevación del fondo aumenta 1 cm en promedio para todas las secciones, aunque al principio del cálculo, la elevación de la sección 1 sube más de 10 cm y la de la sección 1A1 baja más de 2 cm.

También en la figura se puede ver claramente como el río no regresa a las elevaciones del fondo iniciales, es decir, el material producto de la caída de los taludes provoca que se azolve el río, esto coincide con el comportamiento del río observado en los últimos años

6. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo.

Al analizar el fenómeno de la erosión marginal, una de las principales dificultades es encontrar un valor confiable de la tasa de erosión del material, es decir, la cantidad de material que se erosiona por unidad de tiempo, ya que como se ve en el cap 2 la obtención de este valor involucra una gran cantidad de variables.

Después de realizar una revisión bibliográfica, se escogieron y se analizaron dos métodos relacionados con la susceptibilidad a la erosión de materiales cohesivos, la prueba Pinhole, Sherard *et al*[1976], y el método de Arulanandan *et al*[1980] para la obtención del esfuerzo cortante crítico y de la tasa de erosión para muestras inalteradas de materiales cohesivos.

La prueba Pinhole fué diseñada para determinar si una arcilla es dispersiva o no; sin embargo, Grissinger *et al*[1981] toman a la velocidad máxima no erosiva como un parámetro relacionado a la susceptibilidad a la erosión del material.

Por otro lado, para Arulanandan *et al*[1980], la tasa de erosión lateral depende de las características fisicoquímicas del suelo y del tipo y cantidad de sales en los poros del material y del flujo. Las pruebas para

determinar la tasa de adsorción de sodio, SAR; y la concentración de sales CONC, son conocidas en los laboratorios que realizan este tipo de pruebas; sin embargo, la prueba para la determinación de la dispersión dieléctrica $\Delta\epsilon$, no es muy común, debido quizás a que esta es una prueba más elaborada que las otras.

Una ventaja que presenta el modelo de falla de talud de Osman y Thorne[1988], estudiado en el cap 3, sobre los modelos clásicos de falla de talud cuando se trata de determinar la estabilidad de las márgenes de un río, es que toma en cuenta los cambios que sufre la geometría de las márgenes, debidos a la erosión de fondo, ΔZ , y a la erosión marginal, ΔW . Además, permite calcular el volumen del material caído, este es un dato importante cuando se estudia la evolución del fondo del río.

El modelo supone que la falla se presenta a lo largo de una superficie plana, esto es debido a que la mayoría de las márgenes de los ríos tienen ángulos de inclinación cercanos a 90° y este es el modo de falla que se observa comúnmente en orillas de este tipo.

Otro factor que influye en la estabilidad de las márgenes es la presencia de grietas de tensión, si en una margen la erosión de fondo y la marginal son despreciables, la orilla puede fallar debido solamente al efecto de la grieta de tensión. De hecho en el río Mezcalapa-Samaria a partir de varios levantamientos topográficos de las secciones transversales y de resultados obtenidos de corridas de un modelo matemático de fondo móvil se puede ver que en algunas secciones no se presenta erosión de fondo o es muy pequeña, sin embargo, en las visitas que se realizaron al río se vió que las orillas están fallando, por lo que se puede suponer que las grietas de tensión juegan un papel fundamental en el comportamiento de las márgenes del río.

Las gráficas adimensionales incluidas en en cap 4, se construyeron a partir del programa de falla inicial FALLAI y se pueden utilizar para dos fines, ya sea, para determinar si la margen de un río es estable o no, para cualquier condición de erosión marginal y de fondo, o para encontrar la altura para la cual se presenta la falla inicial de la margen.

Al método de Thorne y Osman[1988], se le hicieron algunas modificaciones que se consideraron necesarias:

a) Se incorporó el factor ARENA (que representa el porcentaje de material arenoso que contiene la orilla), al volumen del bloque de falla VB y al volumen del material que se erosiona de la orilla VL, ya que se considera que sólo el material arenoso influye en el proceso de erosión del fondo.

b) Se supuso que el tiempo de remoción del material caído, TR, era función del gasto sólido del fondo del río, Gb, y no del gasto sólido total del río, Gs, como lo suponen los autores.

c) Thorne y Osman[1988], también suponen que si el tiempo de remoción es mayor que el intervalo de tiempo Δt utilizado en el cálculo, en el siguiente intervalo de tiempo no habrá erosión de fondo y la capacidad de transporte del flujo es satisfecha por el material de la orilla que falló. Para verificar esta suposición en el cap 5 se hace el cálculo del tiempo que tarda el río Mezcalapa-Samaría en arrastrar el material del caído y volver a las condiciones iniciales. Utilizando un modelo matemático de fondo móvil se vió que para un volumen de caído de 80000 m^3 (que equivale a un volumen de un bloque de falla de $32 \text{ m}^3/\text{m}$ a lo largo de 2500 m), el río tarda aproximadamente 400 días en alcanzar de nuevo las cotas de fondo iniciales. Esto definitivamente no concuerda con la suposición hecha por Thorne y Osman[1988], sino que se trata de un fenómeno más complejo.

Al analizar las márgenes que tienen problemas de erosión marginal y de falla de talud del río Mezcalapa-Samaría, se observó que si se tienen variaciones pequeñas de las propiedades mecánicas del suelo (c y ϕ), se tienen variaciones grandes de la altura crítica, lo que muestra la importancia de la determinación de las propiedades mecánicas del suelo.

La geometría de las márgenes que se analizaron con el modelo de falla de talud se tomaron de un levantamiento realizado para determinar la geometría de las secciones del río, por lo que para tener datos más confiables de la geometría de las márgenes, de la localización de las grietas de tensión, si existen, y una mejor comprensión de la forma en que fallan los taludes se deben realizar levantamientos de detalle de las márgenes donde se tienen problemas de erosión.

Finalmente, debido a que el modelo de falla de talud es aplicable a orillas con un ángulo de inclinación mayor de 60° y para materiales cohesivos o con un alto contenido de material cohesivo, no se puede

aplicar a todo lo largo del río ni a cualquier tipo de material, sin embargo se trata de un modelo bastante completo, que toma en cuenta la mayoría de los factores que influyen en el problema y que permite tomar decisiones adecuadas para resolver de una manera integral el problema del río Mezcalapa-Samaria.

APENDICE

PROGRAMAS DE FALLA DE TALUD

PROGRAMA FALLAI

Programa para calcular la altura para la cual se presenta la falla inicial de un margen de un río, tomando en cuenta el movimiento del fondo. El programa está escrito en lenguaje FORTRAN77 para microcomputadora PC y consta únicamente del programa principal.

DESCRIPCION DEL PROGRAMA

Al inicio, se abre un archivo para la lectura de datos y otro para la impresión de resultados. Después de la lectura de datos, se asignan valores iniciales y constantes de algunos valores necesarios para el cálculo.

Con estos valores, y utilizando el método de Osman y Thorne[1988] para cálculo de falla de talud inicial, se calcula la altura crítica del talud en función de la erosión de fondo para cada margen; además, se calcula el ángulo de falla, el ancho del bloque de falla y el volumen del bloque de falla. Finalmente se imprimen los datos iniciales y los resultados en la pantalla y en el archivo de resultados.

RESTRICCIONES Y RECOMENDACIONES DE USO DEL PROGRAMA

Las ecuaciones del método propuesto para calcular la altura crítica sólo son válidas para orillas con un ángulo de inclinación mayor de 60° .

INSTRUCTIVO DE USO

Se abren dos archivos, uno de datos y otro de resultados.

Entrada de datos. El programa lee del archivo de datos el número de márgenes por analizar, y para cada margen, lo siguiente

En una línea HO, K, FIP, I, CP, GAMMA, FS

| | |
|-----|--|
| HO | ALTURA INICIAL DE LA ORILLA, EN M |
| K | RELACION DE LA PROFUNDIDAD DE LA GRIETA DE TENSION $K=Y/H$ |
| FIP | ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA DEL MATERIAL, EN GRADOS |
| I | ANGULO INICIAL DE LA ORILLA, EN GRADOS |

CP COHESION DEL MATERIAL, EN KG/M2
 GAMMA PESO ESPECIFICO DEL MATERIAL, EN KG/M3
 FS FACTOR DE SEGURIDAD ≥ 1

Después asigna los valores iniciales de H y H', convierte los valores de FIP e I de grados a radianes; divide los valores de CP y FIP entre el factor de seguridad, para tomar en cuenta la incertidumbre que se tiene al obtener estos parámetros. También asigna otros valores constantes como:

DZ INCREMENTO EN LA EROSION DEL FONDO
 NUMIT NUMERO DE ITERACIONES
 TOL TOLERANCIA

A continuación entra en un ciclo iterativo donde calcula la altura crítica de la margen; cuando la encuentra, imprime los resultados de esa msrgen en la pantalla y en el archivo de resultados y continúa el cálculo de la siguiente margen.

IMPRESION DE RESULTADOS

El programa imprime en la pantalla y en el archivo de resultados los datos iniciales, es decir la altura inicial de la orilla; el ángulo inicial; la relación de la grieta de tensión; el ángulo de fricción interna; la cohesión del suelo; el peso específico del suelo y el factor de seguridad, además imprime la altura crítica de la margen; la erosión de fondo necesaria para llevarla a la falla; el ángulo de falla; el ancho del bloque de falla y el volumen de este bloque por unidad de longitud.

EJEMPLO

Con el fin de mostrar el funcionamiento del programa se plantea el siguiente ejemplo. Se desea conocer la altura crítica de dos márgenes con las siguientes características:

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Margen 1 | Margen 2 |
| Ho = 4.3 m | Ho = 5.7 m |
| K = 0 | K = 0 |
| $\phi = 0^\circ$ | $\phi = 0^\circ$ |
| i = 90° | i = 90° |
| c = 1550 kg/m ² | c = 1900 kg/m ² |
| $\gamma = 1300 \text{ kg/m}^3$ | $\gamma = 1300 \text{ kg/m}^3$ |
| FS = 1 | FS = 1 |

A:\FALLAI <Return>
 NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS

UNIT 2? PARAMI.DAT <Return>
 NOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS

UNIT 3? RESI.DAT <Return>

En la tabla 1 se muestra el archivo de datos PARAMI.DAT y en la tabla 2 el archivo de resultados RESI.DAT.

Tabla 1 Archivo de datos

2
 4.3,0,0,90,1550,1300,1
 5.7,0,0,90,1900,1300,1

Tabla 2 Archivo de resultados

| | | | |
|----------------------------|-------|----------------------|--------|
| MARGEN 1 | | FALLA INICIAL | |
| altura inicial | Ho | 4.30 | m |
| angulo inicial | i | 90.00 | grados |
| relacion grieta de tension | K | .00 | |
| angulo de friccion interna | fi | .00 | grados |
| cohesion | c | 1550.00 | kg/m2 |
| peso especifico del suelo | GAMMA | 1300.00 | kg/m3 |
| factor de seguridad | FS | 1.00 | |
| altura critica | H | 4.75 | m |
| erosion del fondo | DZ | .45 | m |
| angulo de falla | BETA | 45.00 | grados |
| ancho del bloque de falla | BW | 4.75 | m |
| volumen del bloque | VB | 11.27 | m3/m |
| MARGEN 2 | | FALLA INICIAL | |
| altura inicial | Ho | 5.70 | m |
| angulo inicial | i | 90.00 | grados |
| relacion grieta de tension | K | .00 | |
| angulo de friccion interna | fi | .00 | grados |
| cohesion | c | 1900.00 | kg/m2 |
| peso especifico del suelo | GAMMA | 1300.00 | kg/m3 |
| factor de seguridad | FS | 1.00 | |
| altura critica | H | 5.82 | m |
| erosion del fondo | DZ | .12 | m |
| angulo de falla | BETA | 45.00 | grados |
| ancho del bloque de falla | BW | 5.82 | m |
| volumen del bloque | VB | 16.92 | m3/m |

LISTADO DEL PROGRAMA

Este programa consta de 140 lineas

\$DEBUG

PROGRAM FALLAI

```
C
C PROGRAM FALLA INICIAL HECHO EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA
C VERSION 1.0-91.03 MBV/CFD
C
C CALCULO DE LA ALTURA PARA LA CUAL SE PRESENTA LA FALLA INICIAL
C EN UNA MARGEN DE UN RIO. SE UTILIZA EL METODO DE OSMAN Y THORNE
C QUE TOMA EN CUENTA EL MOVIMIENTO DEL FONDO. TAMBIEN SE OBTIENE
C EL ANGULO DE FALLA PLANA, EL ANCHO DEL BLOQUE DE FALLA Y EL
C VOLUMEN DE ESTE BLOQUE POR UNIDAD DE LONGITUD DEL RIO.
C
```

```
REAL I,K,LAM1,LAM2,LAM3
WRITE(*,10)
10 FORMAT(' NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS' /)
OPEN(2,FILE=' ',STATUS='OLD')
WRITE(*,20)
20 FORMAT(' NOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS' /)
OPEN(3,FILE=' ',STATUS='NEW')
```

```

C
C READ(2,*) NMAR
C NMAR NUMERO DE MARGENES A ANALIZAR
C DO 5000 N=1,NMAR
C
C WRITE(*,*)
C WRITE(*,*) ' MARGEN', N
C WRITE(3,*) ' MARGEN', N
C
C LECTURA DE DATOS
C
C READ(2,*)HO,K,FIP,I,CP,GAMMA,FS
C
C HO ALTURA INICIAL DE LA ORILLA
C K RELACION DE PROFUNDIDAD DE LA GRIETA DE TENSION K=Y/H
C Y PROFUNDIDAD DE LA GRIETA DE TENSION
C H ALTURA CRITICA DE LA ORILLA
C FIP ANGULO DE FRICCION INTERNA DEL MATERIAL
C I ANGULO INICIAL DE LA ORILLA
C CP COHESION DEL MATERIAL
C GAMMA PESO VOLUMETRICO DEL MATERIAL
C FS FACTOR DE SEGURIDAD
C
C H=HO
C HP=HO
C I=I*3.1416/180
C FIP=FIP*3.1416/180
C C=CP/FS
C FI=FIP/FS
C
C DZ=0.1
C NUMIT=100
C TOL=0.005
C
C DO 500 J=1,NUMIT
C H=H+DZ
C RF=H/HP
C IF (I.EQ.1.5708)THEN
C BETA=(1.5708+FI)/2
C ELSE
C BETA=(ATAN((RF**2)*(1-K**2)*TAN(I))+FI)/2
C ENDF
C LAM1=(1-K**2)*(SIN(BETA)*COS(BETA)-(COS(BETA))**2*TAN(FI))
C LAM2=2*(1-K)*C/(GAMMA*HP)
C LAM3=(SIN(BETA)*COS(BETA)*TAN(FI)-(SIN(BETA))**2)/TAN(I)
C
C C1=LAM2/LAM1
C C2=LAM3/LAM1
C RC=(C1+SQRT(C1**2-4*C2))/2.
C
C IF (ABS(RF-RC).LT.TOL) THEN
C GOTO 1000
C ELSE
C IF (RF.GT.RC) THEN
C H=H-DZ
C DZ=0.001
C GOTO 550
C ENDF
C ENDF
C 500 CONTINUE

```

```

C
550 CONTINUE
DO 600 J=J,NUMIT
H=H+DZ
RF=H/HP
IF (1.EQ.1.5708)THEN
BETA=(1.5708+FI)/2
ELSE
BETA=(ATAN((RF**2)*(1-K**2)*TAN(I))+FI)/2
ENDIF
LAM1=(1-K**2)*(SIN(BETA)*COS(BETA)-(COS(BETA))**2*TAN(FI))
LAM2=2*(1-K)*C/(GAMMA*HP)
LAM3=(SIN(BETA)*COS(BETA)*TAN(FI)-(SIN(BETA))**2)/TAN(I)
C
C1=LAM2/LAM1
C2=LAM3/LAM1
RC=(C1+SQRT(C1**2-4*C2))/2
C
IF (ABS(RF-RC).LT.TOL) THEN
GOTO 1000
ELSE
IF (RF.GT.RC) THEN
WRITE(3,*)' LA ALTURA INICIAL ES MAYOR QUE LA ALTURA',
* ' CRITICA'
WRITE(*,*)' .....
WRITE(*,*)' LA ALTURA INICIAL ES MAYOR QUE LA ALTURA',
* ' CRITICA'
WRITE(*,*)' REVISAR LOS DATOS DEL TALUD'
GOTO 5000
ENDIF
ENDIF
600 CONTINUE
C
1000 CONTINUE
Y=K*H
BW=((H-Y)/TAN(BETA))-(HP/TAN(I))
VB=((H**2-Y**2)/TAN(BETA))-(HP**2/TAN(I))/2
BETA=BETA*180/3.1416
I=I*180/3.1416
C
WRITE(3,40)HO,I,K,FI,C,GAMMA,FS,H,H-HP,BETA,BW,VB
WRITE(*,40)HO,I,K,FI,C,GAMMA,FS,H,H-HP,BETA,BW,VB
40 FORMAT(' FALLA INICIAL',//,
* ' altura inicial Ho',10X,F6.2,' m'/,
* ' angulo inicial i',11X,F6.2,' grados'/,
* ' relacion grieta de tension K',11X,F6.2,/,
* ' angulo de friccion interna fi',10X,F6.2,' grados'/,
* ' cohesion c',11X,F8.2,' kg/m2'/,
* ' peso especifico del suelo GAMMA',7X,F8.2,' kg/m3'/,
* ' factor de seguridad FS',10X,F6.2,/,
* ' altura critica H',11X,F6.2,' m'/,
* ' erosion del fondo DZ',10X,F6.2,' m'/,
* ' angulo de falla BETA',8X,F6.2,' grados'/,
* ' ancho del bloque de falla BW',10X,F6.2,' m'/,
* ' volumen del bloque VB',10X,F6.2,' m3/m'/)
C
PAUSE
5000 CONTINUE
END

```


PROGRAMA FALLAP

Programa para calcular la altura para la cual se presenta una falla paralela a otra falla en una margen de un rio, tomando en cuenta el movimiento del fondo. El programa está escrito en lenguaje FORTRAN77 para microcomputadora PC y consta únicamente del programa principal.

DESCRIPCION DEL PROGRAMA

Al inicio, se abre un archivo para la lectura de datos y otro para la impresión de resultados. Después de la lectura de datos, se asignan valores iniciales y constantes de algunos valores necesarios para el cálculo.

Con estos valores, y utilizando el método de Osman y Thorne[1988] para cálculo de falla de talud paralela, se calcula la altura crítica del talud en función de la erosión de fondo para cada margen; además, se calcula el ángulo de falla, el ancho del bloque de falla y el volumen del bloque de falla. Es importante señalar que el ángulo de falla es el mismo que el ángulo inicial del talud. Finalmente se imprimen los datos iniciales y los resultados en la pantalla y en el archivo de resultados.

RESTRICCIONES Y RECOMENDACIONES DE USO DEL PROGRAMA

Las ecuaciones del método propuesto para calcular la altura crítica sólo son válidas para orillas con un ángulo de inclinación mayor de 60°.

INSTRUCTIVO DE USO

Se abren dos archivos, uno de datos y otro de resultados.

Entrada de datos. El programa lee del archivo de datos el número de márgenes por analizar, y para cada margen, lo siguiente

En una línea HO, K, FIP, I, CP, GAMMA, FS

| | |
|-------|--|
| HO | ALTURA INICIAL DE LA ORILLA, EN M |
| K | RELACION DE LA PROFUNDIDAD DE LA GRIETA DE TENSION $K=Y/H$ |
| FIP | ANGULO DE FRICCION INTERNA DEL MATERIAL, EN GRADOS |
| I | ANGULO INICIAL DE LA ORILLA, EN GRADOS |
| CP | COHESION DEL MATERIAL, EN KG/M ² |
| GAMMA | PESO ESPECIFICO DEL MATERIAL, EN KG/M ³ |
| FS | FACTOR DE SEGURIDAD ≥ 1 |

Después asigna los valores iniciales de H y H', convierte los valores de FIP e I de grados a radianes; divide los valores de CP y FIP entre el factor de seguridad, para tomar en cuenta la incertidumbre que se tiene al obtener estos parámetros. También asigna otros valores constantes como:

| | |
|-------|------------------------------------|
| DZ | INCREMENTO EN LA EROSION DEL FONDO |
| NUMIT | NUMERO DE ITERACIONES |
| TOL | TOLERANCIA |

A continuación entra en un ciclo iterativo donde calcula la altura crítica de la margen; cuando la encuentra, imprime los resultados de esa margen en la pantalla y en el archivo de resultados y continúa el cálculo de la siguiente margen.

IMPRESION DE RESULTADOS

El programa imprime en la pantalla y en el archivo de resultados los datos iniciales, es decir la altura inicial de la orilla; el ángulo inicial; la relación de la grieta de tensión; el ángulo de fricción interna; la cohesión del suelo; el peso específico del suelo y el factor de seguridad, además imprime la altura crítica de la margen; la erosión de fondo necesaria para llevarla a la falla; el ángulo de falla; el ancho

del bloque de falla y el volumen de este bloque por unidad de longitud.

EJEMPLO

Con el fin de mostrar el funcionamiento del programa se plantea el siguiente ejemplo. Se desea conocer la altura critica de dos márgenes con las siguientes características:

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Margen 1 | Margen 2 |
| Ho = 4.3 m | Ho = 5.7 m |
| K = 0 | K = 0 |
| $\phi = 0^\circ$ | $\phi = 0^\circ$ |
| i = 60° | i = 60° |
| c = 1550 kg/m ² | c = 1900 kg/m ² |
| $\gamma = 1300 \text{ kg/m}^3$ | $\gamma = 1300 \text{ kg/m}^3$ |
| FS = 1 | FS = 1 |

A:\FALLAP <Return>
NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS

UNIT 2? PARAMP.DAT <Return>
NOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS

UNIT 3? RESP.DAT <Return>

En la tabla 3 se muestra el archivo de datos PARAMP.DAT y en la tabla 4 el archivo de resultados RESP.DAT.

Tabla 3 Archivo de datos

2
4.3,0,0,60,1550,1300,1
5.7,0,0,60,1900,1300,1

Tabla 4 Archivo de resultados

| | | | |
|----------------------------|----------------|---------|-------------------|
| MARGEN | 1 | | |
| | FALLA PARALELA | | |
| altura inicial | Ho | 4.30 | m |
| angulo inicial | i | 60.00 | grados |
| relacion grieta de tension | K | .00 | |
| angulo de friccion interna | fi | .00 | grados |
| cohesion | c | 1550.00 | kg/m ² |
| peso especifico del suelo | GAMMA | 1300.00 | kg/m ³ |
| factor de seguridad | FS | 1.00 | |
| altura critica | H | 7.84 | m |
| erosion del fondo | DZ | 3.54 | m |
| angulo de falla | BETA | 60.00 | grados |
| ancho del bloque de falla | BW | 2.04 | m |
| volumen del bloque | VB | 12.40 | m ³ /m |
| MARGEN | 2 | | |
| | FALLA PARALELA | | |
| altura inicial | Ho | 5.70 | m |
| angulo inicial | i | 60.00 | grados |
| relacion grieta de tension | K | .00 | |

| | | | |
|----------------------------|-------|---------|-------------------|
| angulo de friccion interna | fi | .00 | grados |
| cohesion | c | 1900.00 | kg/m ² |
| peso especifico del suelo | GAMMA | 1300.00 | kg/m ³ |
| factor de seguridad | FS | 1.00 | |
| altura critica | H | 10.00 | m |
| erosion del fondo | DZ | 4.30 | m |
| angulo de falla | BETA | 60.00 | grados |
| ancho del bloque de falla | BW | 2.48 | m |
| volumen del bloque | VB | 19.49 | m ³ /m |

LISTADO DEL PROGRAMA

Este programa consta de 127 líneas

\$DEBUG

```

PROGRAM FALLAP
C
C  PROGRAMA FALLA PARALELA HECHO EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA
C  VERSION 1.0-91.03 MBV/CFD
C
C  CALCULO DE LA ALTURA PARA LA CUAL SE PRESENTA UNA FALLA
C  PARALELA A OTRA FALLA EN UNA MARGEN DE UN RIO. SE UTILIZA EL
C  METODO DE OSMAN Y THORNE QUE TOMA EN CUENTA EL MOVIMIENTO DEL
C  FONDO. TAMBIEN SE OBTIENE EL ANGULO DE FALLA PLANA, EL ANCHO
C  DEL BLOQUE DE FALLA Y EL VOLUMEN DE ESTE BLOQUE POR UNIDAD DE
C  LONGITUD DEL RIO.
C
REAL I,K,OMG1,OMG2
WRITE(*,10)
10 FORMAT(' NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS' /)
OPEN(2,FILE=' ',STATUS='OLD')
WRITE(*,20)
20 FORMAT(' NOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS' /)
OPEN(3,FILE=' ',STATUS='NEW')
C
READ(2,*) NMAR
C  NMAR  NUMERO DE MARGENES A ANALIZAR
DO 5000 N=1,NMAR
C
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) ' MARGEN', N
WRITE(3,*) ' MARGEN', N
C
C  LECTURA DE DATOS
C
READ(2,*)HO,K,FIP,I,CP,GAMMA,FS
C
C  HO  ALTURA INICIAL DE LA ORILLA
C  K  RELACION DE PROFUNDIDAD DE LA GRIETA DE TENSION K=Y/H
C  Y  PROFUNDIDAD DE LA GRIETA DE TENSION
C  H  ALTURA CRITICA DE LA ORILLA
C  FIP ANGULO DE FRICCION INTERNA DEL MATERIAL
C  I  ANGULO INICIAL DE LA ORILLA
C  CP  COHESION DEL MATERIAL
C  GAMMA PESO VOLUMETRICO DEL MATERIAL
C  FS  FACTOR DE SEGURIDAD
C
H=HO
HP=HO
I=I*3.1416/180

```

```

FIP=FIP*3.1416/180
C=CP/FS
FI=FIP/FS
BETA=I

C
DZ=0.1
NUMIT=100
TOL=0.005

C
DO 500 J=1,NUMIT
H=H+DZ
RF=H/HP

C
OMG1=(COS(BETA)*SIN(BETA)-(COS(BETA))**2*TAN(FI))
OMG2=2*(1-K)*C/(GAMMA*HP)
C1=OMG2/OMG1
RC=(C1+SQRT(C1**2+4))/2

C
IF (ABS(RF-RC).LT.TOL) THEN
GOTO 1000
ELSE
IF (RF.GT.RC) THEN
H=H-DZ
DZ=0.001
GOTO 550
ENDIF
ENDIF
500 CONTINUE

C
550 CONTINUE
DO 600 J=J,NUMIT
H=H+DZ
RF=H/HP

C
OMG1=(COS(BETA)*SIN(BETA)-(COS(BETA))**2*TAN(FI))
OMG2=2*(1-K)*C/(GAMMA*HP)
C1=OMG2/OMG1
RC=(C1+SQRT(C1**2+4))/2

C
IF (ABS(RF-RC).LT.TOL) THEN
GOTO 1000
ELSE
IF (RF.GT.RC) THEN
WRITE(3,*)' LA ALTURA INICIAL ES MAYOR QUE LA ALTURA',
' CRITICA'
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)' .....
WRITE(*,*)' LA ALTURA INICIAL ES MAYOR QUE LA ALTURA',
' CRITICA'
WRITE(*,*)' REVISAR LOS DATOS DEL TALUD'
GOTO 5000
ENDIF
ENDIF
600 CONTINUE

C
1000 CONTINUE
Y=K*H
BW=(H-HP)/TAN(BETA)
VB=(H**2-HP**2)/(2*TAN(BETA))
BETA=1*180/3.1416

```

I=I*180/3.1416

C

WRITE(3,40)HO, I, K, FI, C, GAMMA, FS, H, H-HP, BETA, BW, VB

WRITE(*,40)HO, I, K, FI, C, GAMMA, FS, H, H-HP, BETA, BW, VB

```
40 FORMAT('          FALLA PARALELA',//,  
• '          altura inicial      Ho',10X,F6.2,' m',/  
• '          angulo inicial      I',11X,F6.2,' grados',/  
• ' relacion grieta de tension   K',11X,F6.2,/,  
• ' angulo de friccion interna   fi',10X,F6.2,' grados',/  
• '          cohesion            c',11X,F8.2,' kg/m2',/  
• ' peso especifico del suelo    GAMMA',7X,F8.2,' kg/m3',/  
• ' factor de seguridad          FS',10X,F6.2,/,  
• '          altura critica      H',11X,F6.2,' m',/  
• '          erosion del fondo    DZ',10X,F6.2,' m',/  
• '          angulo de falla      BETA',8X,F6.2,' grados',/  
• ' ancho del bloque de falla    BW',10X,F6.2,' m',/  
• '          volumen del bloque   VB',10X,F6.2,' m3/m',/)
```

C

5000 PAUSE
CONTINUE
END

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de una forma especial al Ing. Moisés Berezowsky que además de haber dedicado su tiempo a la dirección de este trabajo, me dió una gran cantidad de consejos que me servirán a lo largo de mi vida.

También al Ing. Abel Jiménez y al Dr. Efraín Ovando todas las consultas y asesorías durante la realización de este trabajo. Al Ing. Víctor Franco de la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería las facilidades prestadas en la impresión de este trabajo.

A mis amigos de toda la carrera Martha, Bernardo, Juan José y Gerardo por todos los momentos que compartimos. A mis compañeros becarios del Instituto de Ingeniería, Christian, Marco Antonio y Leonardo por la amistad que me brindaron y al Ing. Antonio Alvarado por sus atinadas contribuciones y comentarios en la parte final del trabajo.

Finalmente a los Ingenieros Rafael y Francisco Echavarría por el apoyo y consejos recibidos durante la carrera que ayudaron a mi formación como Ingeniero.

A todos, muchas gracias.

REFERENCIAS

Arulanandan, K., Gillogley, E., and Tully, R.[1980]. "Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils."Report GL-80-5, U.S. Army Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

Berezowsky, M., Jiménez, AA.[1989]. "Flujo no permanente en ríos". Cap 6 del Manual de Ingeniería de Ríos, elaborado para la SARH, Instituto de Ingeniería, UNAM, 175 pp.

Craig, R.[1974]. "Soil Mechanics", Van Nostrand Reinhold Company Ltd, London.

Graf W. H.[1971]. "Hydraulics of sediment transport." McGraw-Hill Co., New York.

Grissinger E. H.[1982]. "Bank erosion of cohesive materials." (Gravel-bed Rivers. Edited by Hey, R. D., Bathurst, J. C. and Thorne, C. R. John Wiley and Sons Ltd).

Grissinger, E. H., Little, W. C. y Murphey, J. B.[1981]. "Erodibility of streambank materials of low cohesion."Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 24, No. 3, pp. 624-630.

Holtz, D. R., Kovacs, D. W.[1981] "An introduction to Geotechnical Engineering". Prentice-Hall, Engineering Series.

Hooke, J. M.[1979] "An analysis of the processes of river bank erosion." J. Hydrol., 42, 39-62.

Jumikis, A. R.[1984]. "Soil Mechanics", Van Nostrand, New York.

Lohnes, R., and Handy, R. L.[1968]. "Slope angles in friable loess." J. Geol., 76, 247-258.

Maza, A. J., Camargo, H. J., Franco, V.[1981]. "Manual de diseño de obras civiles. Hidrotecnia. A.2.11. Hidráulica Fluvial", Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Osman, A. M.[1985]. "Channel width response to changes in flow hydraulics and sediment load." thesis presented to Colorado State University, at Fort Collins, Colo., in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy.

Osman, A. M. and Thorne C. R.[1988]. "Riverbank stability analysis. I : Theory." Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 2 February.

Ponce, V. M.[1978]. "Generalized stability analysis of channel banks." J. Irrig. Drainage Div., ASCE, 104(4), 343-350.

Secretaría de Agricultura y Ganadería[1963]. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. "Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos.", México.

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., and Steele, E. F.[1976]. "Pinhole test for identifying dispersive soils." Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 102, No. GT1, January.

Spangler, M. G. and Handy, R. L.[1973]. "Soil engineering." 3^d Ed., Intext Educational, New York, N. Y.

Taylor, D. W.[1948]. "Fundamentals of soil mechanics." John Wiley and Sons, New York, N. Y.

Thorne, C. R.[1981]. "Field measurements of rate of bank erosion and bank material strength." Erosion and sediment transport measurement. Proc., Florence Symp., International Association for Hydraulic Science Publ. No. 133, Florence, Italy.

Thorne, C. R. and Osman, A. M.[1988]. "Riverbank Stability Analysis. II : Applications". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 2, February.

Thorne, C. R., Murphey, J. B., and Little, W. C.[1981]. "Bank stability and bank material properties in the bluffline streams of northwest Mississippi." Stream channel stability, Appendix D, Section 32 Program, Work Unit 7, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg District, Vicksburg, Miss.

Wolman, M. G.[1959]. "Factors influencing the erosion of cohesive river banks." Amer. J. Sci., 257, 204-216.

Yurrieta, J., Zurita, M.[1986]. "Sistemas de Unidades, Fasciculo 2", Facultad de Ingenieria, Universidad Nacional Autónoma de México.