

11821
7



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

CALCULO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES CON SECCION
HOMOGENEA ASISTIDO POR COMPUTADORA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO AGRICOLA

P R E S E N T A :

HOMERO

CUEVAS

MADRID

ASESOR: ING. SALVADOR CLEMENTE DEL CASTILLO RABADAN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2003

A



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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

" Cálculo de la Estabilidad de Taludes con Sección Homogénea
asistido por computadora"

que presenta el pasante: Homero Cuevas Madrid
con número de cuenta: 9405918-2 para obtener el título de:
Ingeniero Agrícola

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 17 de Septiembre de 2003

PRESIDENTE Ing. Alfonso Delgado Antunez

VOCAL Ing. Manuel García de la Rosa

SECRETARIO Ing. Salvador Clemente del Castillo Rabadán

PRIMER SUPLENTE Ing. José Leonides Sánchez González

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Gustavo Mercado Mancera

B

Agradecimientos

Al Dios Todopoderoso Creador del Cielo y de la Tierra y de todo lo que en ellos hay, por su gran poder y amor manifestados en mi vida, que sin su mano de bendición no hubiera sido posible llegar al fin de esta etapa de mi vida.

A Nuestro Señor y Salvador Jesucristo por su enorme y amoroso sacrificio por el cuál ahora tenemos libre acceso a Dios siendo renacidos de simiente incorruptible.

A mí mamá la Señora María Luisa Madrid Rivera por su amor, cuidados, sacrificios y ayuda incondicional a lo largo de toda mi vida.

A mí hermano Carlos Arath Cuevas Madrid por sus acertados consejos y aportaciones en el desarrollo de este trabajo.

A mí querida novia María de Lourdes Fernández Salazar por el impulso, apoyo, cariño y confianza que me ha brindado desde el momento que la conocí.

A mí papá el Señor Carlos Cuevas Díaz de León por su apoyo y consejos que me han sido útiles en mi desarrollo personal.

A mi abuelita la Señora Elisa Rivera Valadéz por el enorme apoyo, consejos y cariño que me ha dado siempre.

A mi hermano Juan Francisco Cuevas Madrid que si no fuera con por él no sería quien soy ahora.

A mí profesor y amigo el Ing. Salvador Clemente Del Castillo Rabadán por su amable asesoría, consejos y su gran calidad humana.

Al Ing. Manuel García De la Rosa por su amistad y sus oportunas observaciones.

Al Ing. José Leonides Sánchez González por sus aportaciones a este trabajo.

Al Ing. Gustavo Mercado Mancera por el apoyo dado a la realización de este trabajo.

Al. Ing. Alfonso Delgado Antunez por las facilidades brindadas a este trabajo.

A la Química Aída De Anda Serrano por las observaciones de estilo y redacción hechas a este trabajo.

A todos mis profesores que me brindaron los conocimientos y bases para formar al profesionalista que soy ahora.

A mis compañeros y amigos de la Generación 22 por todas las experiencias y momentos inolvidables que vivimos juntos.

A mis compañeros y amigos de la Generación 23, especialmente a Ahui.

A Zill y a Linda por sus aportaciones a este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán y a la Carrera de Ingeniería Agrícola por el hermoso privilegio de haber estado en sus aulas.

A ITS por darme la pauta de lo que quiero hacer el resto de mi vida.

Al Ejército Mexicano por brindarme la oportunidad y privilegio de pertenecer a sus filas y por la formación que he recibido, que sé que me será muy útil a lo largo de mi desarrollo personal y profesional.



PAGINACIÓN DISCONTINUA

Índice General

Índice de figuras	III
Índice de tablas	IV
I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos particulares	4
1.5 Alcance del programa de cómputo CALESTT con el anexo	4
II REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Antecedentes históricos	5
2.2 Consideraciones generales de la estabilidad de taludes	7
2.3 Tipos de sección	9
2.4 Causas de falla	10
2.5 Diseño del bordo	13
2.5.1 Estudios necesarios para el diseño del bordo	13
2.5.1.1 Estudios de laboratorio de mecánica de suelos	16
2.5.2 Taludes	19
2.5.3 Ancho de la corona	20
2.5.4 Altura del bordo	20
2.6 Descripción del Método Sueco	22
2.7 Determinación de la línea de saturación	25
2.8 Análisis del círculo de falla	29
2.8.1 Condiciones de análisis	30
2.9 Fuerzas de filtración	31
2.10 Factor de Seguridad contra el Deslizamiento (FSD)	32
2.11 Factor de Seguridad contra la Tubificación (FST)	40
2.12 Métodos para mejorar la estabilidad de taludes	41
III MATERIALES Y MÉTODOS	46
3.1 Materiales	46
3.2 Métodos (fase del diseño del programa)	46
3.3 Procedimiento para calcular la estabilidad de taludes con la ayuda del programa de cómputo	47
3.3.1 Recomendaciones para el uso del programa de cómputo	51
IV RESULTADOS Y ANÁLISIS	55
4.1 Resultados y análisis	55
V CONCLUSIONES	61

Glosario	63
Bibliografía citada	66
Bibliografía consultada	68
Anexo	70

Índice de figuras

Fig. 1 Sección homogénea	9
Fig. 2 Sección graduada	10
Fig. 3 Sección mixta	10
Fig. 4 Presa de tierra de sección homogénea	22
Fig. 5 Procedimiento que se sigue para aplicar el Método Sueco en un suelo puramente cohesivo	24
Fig. 6 Trazo de la línea de saturación	25
Fig. 7 Valores del Dr. Arturo Casagrande para α	28
Fig. 8 Círculos de falla que generalmente se analizan	29
Fig. 9 Método Sueco	36
Fig. 10 Uso de bermas para mejorar la estabilidad de un talud	43
Fig. 11 Configuración del área de pantalla	47
Fig. 12 Pantalla de inicio de CALESTT	48
Fig. 13 Pantalla del cálculo de la línea de saturación	49
Fig. 14 Cuadro de diálogo de impresión de AutoCAD	50
Fig. 15 Pantalla del cálculo de los factores de seguridad	51

Índice de tablas

Tabla 1 Taludes recomendados en base a la altura del bordo	19
Tabla 2 Anchos de corona recomendados en base a la altura del Bordo	20
Tabla 3 Valores de $\Delta a/(a + \Delta a)$ en correlación a	28
Tabla 4 Valores de α y β	30
Tabla 5 Dimensiones que poseen las redes dibujadas en AutoCAD	51
Tabla 6 Porcentajes de diferencia relativa (D.R.) entre resultados de "a" con diferentes anchos de corona	56
Tabla 7. Porcentajes de D.R entre los resultados obtenidos del análisis manual y con CALESTT	59

I INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En este trabajo se calcula la estabilidad de taludes según el criterio del Método Sueco adaptado a un programa de cómputo de diseño y elaboración propia en Visual Basic 6.0 llamado CALESTT el cual realiza los cálculos para secciones homogéneas, es decir la cortina es de un solo material, en este caso tierra.

El programa de cómputo es versátil lo que significa que dicho programa permite analizar diferentes variables tales como el valor de los taludes, altura de la cortina, ancho de la corona, las características geométricas de la sección transversal y las variables propias del suelo tales como el ángulo de fricción interna, la cohesión y el peso volumétrico húmedo.

Con ésta información disponible el programa de análisis de cómputo sirve para calcular el factor de seguridad contra el deslizamiento con la innovación de incluir las fuerzas de filtración en el cálculo para el talud de aguas abajo, así como el factor de seguridad contra la tubificación y el gasto en la red de flujo.

El programa de cómputo permite trazar redes de flujo mediante un anexo de archivos de AutoCAD siguiendo el método gráfico que tiene como únicas condiciones: respetar las fronteras de la red de flujo y que las equipotenciales y las líneas de corriente se corten ortogonalmente, ya que con el conocimiento de la red de flujo se obtienen las fuerzas de subpresión, el gradiente máximo, gasto de agua a través de la cortina y las fuerzas de filtración, que son elementos esenciales para el análisis de la estabilidad de taludes.

Finalmente se realizó un análisis comparativo entre los resultados arrojados por los cálculos realizados manualmente y los obtenidos con la ayuda del programa de cómputo.

1.2 Justificación

Las tendencias actuales son aumentar la productividad y confiabilidad en las actividades humanas con la optimización del tiempo y los recursos económicos. El cálculo de la estabilidad de taludes es un trabajo relativamente largo y laborioso por lo que en esta tesis se hace un intento por automatizar el procedimiento de cálculo mediante la ayuda del programa de cómputo antes mencionado.

El cálculo de la estabilidad de taludes con la ayuda del programa de cómputo como el que se elaboró, dicho análisis se puede realizar de una forma más breve, completa, exacta y económica.

Por otra parte el querer automatizar el cálculo de las obras hidráulicas surge por la importancia que éstas tienen en el contexto agrícola, pues pueden transformar un terreno de temporal en un terreno de riego lográndose así una mayor productividad y rentabilidad puesto que un terreno de riego puede ser una huerta de frutales, o bien, se puede establecer dos cultivos al año, otra ventaja de transformar los terrenos de temporal a terrenos de riego es que en ocasiones un solo riego de auxilio puede ser la diferencia entre lograr una buena cosecha o la pérdida total del esfuerzo y dinero invertidos durante varios meses.

1.3 Objetivo General

Calcular la estabilidad de taludes según el criterio del Método Sueco con la ayuda de un programa de cómputo.

1.4 Objetivos Particulares

Diseñar y elaborar el programa de cómputo que asiste en el cálculo de la estabilidad de taludes, así como el procedimiento de cálculo con el programa.

Proponer la inclusión de las fuerzas de filtración en el cálculo del Factor de Seguridad contra el Deslizamiento en el talud de aguas abajo.

1.5 Alcance del programa de cómputo CALESTT con el anexo

Este método particular de calcular la estabilidad de taludes, aplica a aquellos bordos con alturas que van de los 5 a los 10 metros, con taludes aguas arriba y abajo de 1:1, 2:1, 2.5:1, 3:1 y 3.5:1, con corona de 4 a 6 metros de longitud, un libre bordo de un metro y que sean de material homogéneo, pues son las dimensiones que más comúnmente se ocupan en obras de almacenamiento para riego y abrevadero.

Se puede calcular la estabilidad de taludes con medidas diferentes a las especificadas anteriormente, sólo que la ayuda de la computadora será más limitada, ya que en el anexo de archivos de AutoCAD solamente se cuenta con dibujos de las medidas mencionadas en el párrafo anterior.

II REVISION DE LITERATURA

2.1 Antecedentes históricos

Al hablar de la estabilidad de taludes, se hace referencia a las obras de aprovechamiento para la captación del agua superficial, tomando como base la necesidad de incorporar al riego las pequeñas superficies de terreno agrícola que ejidatarios y campesinos explotan bajo condiciones de temporal, con la finalidad de garantizar al menos una cosecha al año, incorporar cultivos más remunerativos y mejorar con ello sus condiciones de vida.

La Historia nos muestra que las obras hidráulicas se han venido desarrollando en México desde hace mucho tiempo como se puede ver a continuación.

Estudios realizados han permitido localizar 382 obras precortesianas de riego en la parte central de México. (Arteaga, 1985).

Entre 1821 y 1866 debido a que el país se encontraba en una situación de continuas guerras, no se construyeron obras importantes, sin embargo los hacendados realizaron un gran número de pequeños bordos con fines de riego y abrevadero.

Después de este tiempo y hasta 1910 se incrementó la construcción de dichas obras, las más destacadas fueron las de saneamiento de la Ciudad de México, la Presa La Esperanza en Guanajuato, y la Presa San Pedro en San Luis Potosí, entre otras. (Arteaga, 1985).

Para 1930 la Comisión Nacional de Irrigación inició la construcción y operación de los primeros grandes sistemas de riego. Posteriormente bajo la tutela de la SRH establecida en 1946, mas tarde con la SARH, SAGAR,

SEMARNAP y actualmente con la SEMARNAT a través de la Comisión Nacional del Agua CNA y por la iniciativa privada, esta tarea ha continuado hasta nuestros días, en que una parte muy importante de los recursos hidráulicos superficiales están siendo aprovechados y en su mayor parte para el riego agrícola de las grandes áreas. (CNA, 2001).

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación, así como el impulso que ha recibido la construcción de presas de tierra en todo el mundo en los últimos años y el desarrollo de obras de protección contra la acción de ríos por medio de bordos, han puesto al diseño y construcción de taludes en un plano de importancia ingenieril de primer orden. Tanto por el aspecto de inversión, como el de consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras ingenieriles que exigen un mayor cuidado por parte del proyectista. (Badillo, 2001).

Los métodos de cálculo de la estabilidad de taludes, corresponden primeramente a Coulomb (1773), así como a Francais (1820), que supusieron el deslizamiento como una superficie plana. Fue hasta 1846 cuando Collin, por medio de mucha investigación descubrió que la superficie de falla era curva.

Más adelante estas teorías fueran comprobadas y desarrolladas por Petterson (1926). El procedimiento desarrollado por estos últimos en Suecia, se con el nombre de Método Sueco y forma la base de los procedimientos de cálculo de nuestros días. (Flamand, 1995).

2.2 Consideraciones generales de la estabilidad de taludes

Un talud no es otra cosa que la cotangente del ángulo que una masa de tierra forma con la horizontal y generalmente se representa con la letra m , donde m es igual a $\text{Cot } \theta$, y donde θ es el citado ángulo.

El Dr. Eulalio Badillo (2001) lo define como cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana.

Por lo antes expresado los taludes se pueden clasificar en naturales, como son laderas de montañas y cauces, y artificiales en los cuales interviene el hombre, como en:

- a) Cortes y rellenos para carreteras y vías férreas.
- b) Presas de tierra.
- c) Márgenes de canales y otras estructuras para la conducción de agua.
- d) Diques fluviales.
- e) Bordos para retener agua, incluyendo el almacenamiento de aguas negras.
- f) Trabajos de obras de tierra con fines de desarrollo industrial.

En cualquiera de los casos anteriores, al tener el suelo una inclinación (talud), existen fuerzas gravitacionales que tienden a producir la inestabilidad, o sea el deslizamiento de los taludes (Flamand. 1995).

Un factor que contribuye a la falla de taludes en suelos saturados sujetos a un gradiente hidráulico, es la fuerza de filtración ocasionada por el flujo.

Algunas veces las fuerzas sísmicas pueden llegar a ser importantes en el análisis de la estabilidad. Todas estas fuerzas producen esfuerzos cortantes

a través de la masa de suelo ocasionando un desplazamiento, a menos que la resistencia al esfuerzo cortante en toda la superficie sea capaz de contrarrestar el efecto de las fuerzas motrices que generan el desplazamiento. (Flamand, 1995).

El suelo desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos es un material de construcción de primer orden, como lo es el acero, el concreto, la madera y actualmente también los plásticos. Los suelos son aptos para soportar esfuerzos cortantes en forma limitada y de compresión; su resistencia a la tensión es nula.

El valor de la resistencia al esfuerzo cortante de una masa de suelo toma en cuenta la resistencia del suelo a este tipo de esfuerzo y a otros factores naturales, tales como la presencia de infiltración interna y de lluvia, así como de raíces, lentes de hielo, congelamiento de suelo y planos de falla de las rocas en la superficie de desplazamiento. Los huecos que dejan las raíces o bien los producidos por algunos roedores y otros animales, pueden producir mecanismos por medio de los cuales se inicia la falla de un talud. (Flamand, 1995).

En un análisis de estabilidad se debe partir de la forma de la superficie de falla y luego estimar la resistencia al esfuerzo cortante. La superficie de falla es usualmente una superficie curva, que puede asemejarse a un arco de circunferencia.

Es importante definir las condiciones de trabajo de la masa de suelo para determinar su resistencia al esfuerzo ya dicho, puesto que valores demasiado conservadores en un problema dado, conducirían a soluciones antieconómicas. (Flamand, 1995).

2.3 Tipos de sección

La sección de una presa de tierra es la forma que resulta de un corte transversal y perpendicular al eje longitudinal al eje de la presa.

a) Sección homogénea

Como lo indica su nombre está constituida en su mayor parte por un solo suelo que proporciona simultáneamente la impermeabilidad y estabilidad necesarias. Se emplean en este tipo de sección arenas finas y arcillas y suelos gruesos con alto contenido de finos que tienen poca permeabilidad como los son el SC, SM, GC y el GM, clasificaciones según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS. (Arteaga, 1985, Loyola y Zatarín 1998).

Este tipo de sección es la más antigua y aún se utiliza hoy en obras chicas o en casos en que en el sitio de construcción no existe otro material. (Flamand, 1995).



Fig. 1 Sección homogénea

b) Sección graduada

Cuando en el sitio de construcción se dispone de materiales de diferentes permeabilidades en volumen suficiente, suele ser conveniente y económico zonificarlos dentro de la sección. En este tipo de sección, hay zonas

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

que proporcionan la impermeabilidad necesaria al conjunto, si bien, a veces las zonas impermeables contribuyen en algo a la estabilidad. (Badillo, 2001).



Fig. 2 Sección graduada

c) Sección mixta

Está integrada por un corazón impermeable, formada por materiales como los que conforman una sección homogénea, que contribuye poco a la estabilidad, y por respaldos muy importantes en ambos lados del corazón y son de grava, enrocamiento y arenas de alta permeabilidad que aportan la mayor parte de la estabilidad. (Arteaga, 1985).



Fig. 3 Sección mixta

2.4 Causas de la falla

Puesto que las normas de diseño de las presas de tierra se basan por una parte, en el conocimiento de las propiedades mecánicas del material de construcción, y por la otra, en el estudio de los fenómenos que han sido responsables de las fallas ocurridas en el pasado. (Arteaga, 1985), se reconocen como causas de falla mas frecuentes las siguientes:

a) Insuficiencia del vertedor

Puede decirse que una de las causas mas frecuentes de falla ha sido la falta de adecuada estimación del gasto correspondiente a la máxima avenida extraordinaria que debe pasar por el vertedor de excedencias, de tal manera que el agua fluye sobre la corona de la presa, erosionando el talud de aguas abajo y disminuyendo así la estabilidad del talud. En el periodo de 1964 -1983 se reportó que el 67% de las fallas en México registradas fueron por esta razón. (Arreguín, 2000).

b) Tubificación

Al almacenarse agua detrás de una presa de tierra, una parte de dicha agua comienza a filtrarse a través de la presa, de la cimentación o de ambas, siguiendo trayectorias que se inician desde el talud aguas arriba y termina lógicamente en el talud de aguas abajo. La velocidad del flujo, y por lo tanto el gasto de filtración a través de la presa o la cimentación, depende directamente de la permeabilidad del material o materiales de la sección. (Arteaga, 1985). Un factor que contribuye mucho a la tubificación es la insuficiencia en la compactación del bordo, que deja alguna capa del mismo suelta y floja; esto es particularmente probable cerca de muros o superficies de concreto. El porcentaje de fallas por este fenómeno, en el mismo periodo de tiempo corresponde a un 23% (Arreguín, 2000).

c) Agrietamiento

Después de construida una presa de tierra, se producen asentamientos de la corona que varían en magnitud a lo largo del eje de la presa, alcanzando los valores máximos en la sección de mayor altura, aunque en algunas

ocasiones los asentamientos mas grandes se localizan en la sección de menor altura donde la cimentación esta formada por materiales de alta compresibilidad. Cuando los asentamientos en la corona llegan a ser muy diferentes de un punto a otro, se producen tensiones que generan grietas en el cuerpo de la presa, si estas grietas son transversales al eje de la cortina y se presentan cuando el vaso esta lleno, el agua al escurrir entre ellas, las amplia por erosión de sus paredes, y acaba por destruir parcial o totalmente la presa. (Arteaga, 1985). A este tipo de falla se le atribuye el 2 % del total (Arreguin, 2000).

d) Deslizamiento de taludes

Los taludes de una presa deben ser estables aún en las condiciones más desfavorables de esfuerzos que puedan presentarse en la vida de una presa, esta condición implica que los esfuerzos cortantes originados por el propio peso de la presa y las fuerzas de filtración, no deben exceder a los esfuerzos cortantes que los materiales del terraplén y la cimentación sean capaces de soportar (Arteaga, 1985).

e) Fallas por la licuación

A diferencia de la falla por deslizamiento, en la que el talud se desplaza como un cuerpo más o menos rígido a lo largo de una superficie, sea ésta una curva continua o una recta o bien una combinación de ambas y moviéndose una distancia relativamente corta, la llamada falla de flujo se presenta extendiéndose el material sobre un área grande y adoptando finalmente taludes irregulares que llegan a tener pendientes mayores de 10:1, o casi horizontales en ocasiones el material se comporta temporalmente como un fluido. (Arteaga, 1985).

El porcentaje de fallas ocurridas por los fenómenos de deslizamiento y licuación en el período ya mencionado, corresponde al 8% (Arreguín, 2000).

2.5 Diseño del bordo

2.5.1 Estudios necesarios para el diseño del bordo

Para llevar a cabo la construcción del bordo y de toda la obra de almacenamiento se requiere la realización de estudios previos como apoyo indispensable en su diseño y construcción. La finalidad de llevar a cabo estos estudios es para definir la capacidad de almacenamiento y captación que tendrá la obra, además de conocer diferentes aspectos y parámetros de decisión, de carácter técnico, económico, social y ecológico.

Estos estudios son los siguientes. (Pérez Nieto *et al.*, 1998).

1. Estudios Topográficos.
2. Estudios Hidrológicos.
3. Estudios Agrológicos.
4. Estudios Meteorológicos.
5. Estudios de Requerimientos de agua por los cultivos.
6. Estudios de Mecánica de Suelos.
7. Estudios Geológicos.
8. Estudios Socioeconómicos.
9. Aspectos Constructivos.

Los elementos de información que cada uno de estos estudios proporcionan se describen enseguida, a excepción de los estudios del laboratorio de mecánica de suelos, ya que éstos son los que van

inmediatamente relacionados con la estabilidad del talud por lo que se verán con más detalle.

Los estudios topográficos juegan un papel primordial y son imprescindibles. Se debe caracterizar topográficamente la cuenca de captación, el vaso de almacenamiento, la boquilla, un tramo de cauce y el área a regar cuando este sea el caso, así como el área donde se ubicará el canal principal de riego. Para la realización de los levantamientos topográficos pueden emplearse diversos procedimientos, métodos e instrumentos topográficos, siendo el más recomendable el que implique mayor rapidez en la realización de un trabajo, proporcione la precisión requerida y sea el más económico.

La finalidad del levantamiento de la cuenca de captación es la de determinar su área, la longitud y pendiente de sus cauces, la cobertura vegetal y otras características fisiográficas que permiten el cálculo del volumen del escurrimiento medio anual y de la avenida máxima, que a su vez se emplean para el diseño de la cortina y de la obra de excedencias del bordo, respectivamente. El levantamiento del vaso de almacenamiento tiene por objeto, la obtención de un plano que permita conocer el área inundada y del volumen almacenado a distintas alturas de la cortina, diseñar la obra y cuantificar las áreas afectadas. Por otra parte la razón del levantamiento de la boquilla es de elaborar un plano que posibilite el diseño de la cortina y sus estructuras. Cuando se hace el levantamiento de un tramo de cauce y en el caso de no contar con un registro de aforos, se busca la avenida máxima mediante el método de sección y pendiente, que a su vez permita diseñar la obra de excedencias. Finalmente, con el levantamiento topográfico de la zona

de riego, se deben conocer las características de magnitud y relieve de las áreas a regar, a fin de cuantificar los volúmenes necesarios para satisfacerlos.

La finalidad de los estudios hidrológicos es la de conocer la ubicación, magnitud y calidad de la fuente de agua para su almacenamiento en la obra, en relación a su demanda. Y la finalidad de los estudios agrológicos es la de conocer algunas propiedades y características de los suelos desde el punto de vista agrícola, particularmente las que se relacionan con la retención de humedad y el movimiento del agua en el mismo para determinar el requerimiento para el riego y por lo tanto el volumen necesario.

Los estudios meteorológicos tienen como objetivo el conocimiento de la magnitud de los elementos climáticos que tienen que ver con la determinación del volumen posible y el requerimiento por almacenar, tales como la evaporación, precipitación, temperatura y periodos de heladas.

Las características geológicas, son las correspondientes a las áreas donde se construirán las obras que formarán el sistema de riego, tanto la cortina como sus estructuras y el sistema de conducción y distribución del agua por la zona de riego, así como la impermeabilidad del vaso de almacenamiento.

Con los estudios socioeconómicos, se pretende determinar los gastos y beneficios económicos y sociales de la obra proyectada, de manera que se pueda valorar sobre la conveniencia de su construcción.

Por último, los estudios de tipo constructivo deben conducir a la ubicación de los bancos de materiales de construcción, así como la definición del equipo, personal y el tiempo necesarios para el proceso constructivo.

2.5.1.1 Estudios de laboratorio de mecánica de suelos

Las pruebas específicas que son necesarias de realizar para conocer los valores característicos son:

a) Compactación

Se llama compactación al proceso de acción dinámica que aumenta el peso volumétrico de un suelo al mismo tiempo que disminuye la compresibilidad. (Arteaga, 1985).

El objetivo de la compactación es aumentar la resistencia del suelo al esfuerzo cortante, disminuir la compresibilidad y hacerlo menos permeable. La prueba mas común que se hace es la prueba de compactación Proctor.

Por medio de esta prueba se obtienen el peso volumétrico seco óptimo (γ_o) y el contenido de agua óptimo (ω_o). Estos valores sirven de base para que durante la construcción del terraplén, se controle el grado de compactación, especificándose previamente el grado de compactación necesario para dar el factor de seguridad deseado en la obra, de acuerdo con la siguiente relación:

$$\text{Grado de Compactación (c)} = (\gamma_o / \omega_o) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

c = Compactación en %.

γ_o = Peso volumétrico seco óptimo del terraplén.

ω_o = Contenido de agua óptimo.

b) Resistencia al esfuerzo cortante

Para revisar la estabilidad de los taludes que se proponen en el diseño de la sección máxima de un bordo que sea estable y económico, se requiere información de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. En estas pruebas

se trata de reproducir las condiciones en que trabajará el terraplén con pruebas de compresión triaxial. Estas pruebas son:

1) Prueba de compresión triaxial rápida no drenada.

Esta prueba se realiza para condiciones iniciales de no saturación, es decir cuando el bordo está vacío. (Arteaga, 1985).

2) Prueba de compresión triaxial rápida consolidada.

La prueba consolidada se efectúa para condiciones finales o de saturación, es decir, cuando el bordo esta lleno y cuando ocurre un vaciado rápido, condiciones que se presentan principalmente en los bordos con almacenamientos relativamente pequeños. (Arteaga, 1985).

Los resultados que se obtienen de estas pruebas son:

φ = Angulo de fricción interna (grados)

c = Cohesión (kg/m²)

Estos valores sirven para obtener las envolventes de Mohr, que es la envolvente de una serie de círculos de Mohr que representan las condiciones de esfuerzo en la falla de un material dado. De acuerdo con la hipótesis de ruptura de Mohr, una envolvente es el lugar geométrico de los puntos cuyas coordenadas representan las combinaciones de los esfuerzos normales y cortantes que hacen fallar el material.

c) Pruebas de permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad que tiene un suelo de dejarse atravesar por el agua, es decir de permitir el paso del agua a través del mismo; se conoce como coeficiente de permeabilidad (k), se mide en unidades de velocidad generalmente en m/s y se considera constante; este coeficiente se utiliza en el cálculo de la filtración del agua a través del bordo y cimentaciones.

Para determinar este coeficiente se hacen pruebas de permeabilidad, utilizando el permeámetro de carga constante o variable según el material del que se trate. Para limos y arcillas se utiliza el permeámetro de carga variable y para arenas finas se emplea el permeámetro de carga constante. La velocidad media del agua a través de un suelo o de un medio poroso se determina mediante la fórmula de Darcy considerándose el gradiente hidráulico del agua denotado por i .

$$Q = k i A \quad (2)$$

Donde:

Q = Gasto de filtración en m^3/s .

k = Coeficiente de permeabilidad en m/s .

A = Área bruta en la que se produce el flujo en m^2 .

$$i = \Delta h / L \quad (\text{Adimensional}) \quad (3)$$

En la cual:

Δh = El cociente entre la altura de la carga total entre el número de caídas de potencial.

L = Longitud del cuadrado menor de la red de flujo para obtener el gradiente mayor dentro de la red de flujo y en consecuencia la velocidad máxima. O bien escrito de otra manera queda así, siempre y cuando se conozca la red de flujo:

$$Q = (Nt/Ne) k h \quad (1 \text{ m}) \quad (4)$$

Donde:

Q = Descarga en la unidad de tiempo dada generalmente en m^3/s y por dovela unitaria.

Nt = Número de tubos de corriente.

Ne = Número de equipotenciales.

k = Coeficiente de permeabilidad en m/s.

h = Carga máxima en el vaso en metros.

1 m = 1 metro.

Cabe señalar que todos los estudios anteriormente descritos son los mínimos indispensables para que un bordo o presa funcione eficientemente, y para que cumpla con los siguientes requisitos de seguridad mencionados por el Ing. Jesús Villaseñor en 1978 y que hasta hoy siguen vigentes:

- 1) Que el gasto de filtración no afecte sensiblemente el volumen de agua disponible en el almacenamiento.
- 2) Que las subpresiones no afecten la estabilidad de la estructura.
- 3) Que no haya peligro de tubificación.
- 4) Que no haya ninguna posibilidad de que el agua pase por arriba de la cortina.
- 5) Que los taludes sean estables, bajo las condiciones más severas de funcionamiento, a presa llena y a presa vacía.

2.5.2 Taludes

Frecuentemente se establecen valores que pueden servir como punto de partida en una alternativa; por ejemplo, ciertos reglamentos de presas fijan como taludes mínimos los siguientes:

Tabla 1. Taludes recomendados en base a la altura del bordo

Altura de la Presa	Talud Aguas Arriba	Talud Aguas Abajo
4,5 a 12 m.	2:1	1,5:1
12 a 30m.	2,5:1	2:1
30 a 45 m.	3:1	2,5:1

Villaseñor, 1978

También es muy recomendable que el talud de aguas arriba sea igual al talud de aguas abajo, ya que ésto le da mayor robustez a la presa y por ende nos ofrece un mayor factor de seguridad.

2.5.3 Ancho de la corona

Se fija este ancho para aumentar el volumen del bordo y por consiguiente su estabilidad; para asegurar la resistencia de la corona contra los deterioros ocasionados por el oleaje y para establecer los servicios que sean necesarios sobre la presa.

En ciertos códigos de bordos se han fijado como anchos mínimos en la corona, los siguientes:

Tabla 2. Anchos de corona recomendados en base a la altura del bordo

Bordos Hasta 12 m de altura	4,00 m
Bordos Hasta 30 m de altura	6,00 m
Bordos Hasta 45 m de altura	10,00 m

Del Castillo, 2001, Villaseñor, 1978

2.5.4 Altura del bordo

Según Arteaga (1985), la altura de la cortina, que en todos los diseños se debe tener como dato, se obtiene como resultado del estudio hidrológico, en el cual se llega a determinar el volumen de almacenamiento necesario para la demanda, y en relación con él, la altura económica de la presa.

La altura máxima del bordo se obtiene con la fórmula:

$$h' = h + h_d + h_o + LB \quad (5)$$

Donde:

h' = Altura máxima de diseño en m.

h = Distancia vertical entre las elevaciones de la cresta del vertedor demasas y el fondo del cauce del arroyo en metros.

hd = Carga de diseño sobre el vertedor.

ho = altura máxima de las olas en m.

Los componentes de la formula se determinan a continuación:

1.- La altura h se obtiene según se definición, con la formula:

$$h = \text{Elevación (de la cresta del vertedor)} - \text{Elevación (fondo del cauce)} \quad (6)$$

La elevación de la cresta del vertedor corresponde al nivel de aguas normales del embalse, que se denomina elevación N.A.N.E:

2.- La altura hd se obtiene en el diseño de la obra de excedencias.

3.- La altura ho, es la altura de las olas que se forman en el vaso por efecto del viento. Las condiciones más desfavorables ocurren cuando sobre la obra de excedencias o vertedor demasías, este pasando el caudal máximo de diseño y al mismo tiempo sobre la superficie del agua sople el viento de máxima velocidad sostenida.

La altura máxima de las olas esta en función de la velocidad del viento y del fetch, que es la distancia en línea recta que existe entre la cortina y el punto del vaso mas alejado de la misma.

La altura máxima de las olas se calcula con la fórmula:

$$ho = (0,005V - 0,068) F \quad (7)$$

Donde:

ho = Altura máxima de las olas en metros.

F = Fetch en Km.

V = Velocidad del viento en Km/h.

4.-El libre bordo LB, proporciona un factor de seguridad contra situaciones imprevistas, como puede ser la ocurrencia de una avenida mayor a la avenida de diseño o la presencia de asentamientos del bordo mayores a los

considerados. Se recomienda que esta altura libre sea como mínimo de 0,60 m, en las redes que se realizaron para este trabajo el libre bordo es de un metro.

También esta altura está en función de la altura máxima de diseño (h') y de los taludes aguas arriba y aguas abajo.

La suma de h , h_o y h_d nos proporciona el Nivel de Aguas Máximo Extraordinario N.A.M.E., entonces se puede escribir la ecuación 5 como sigue:

$$h' = \text{N.A.M.E.} + \text{LB} \quad (8)$$

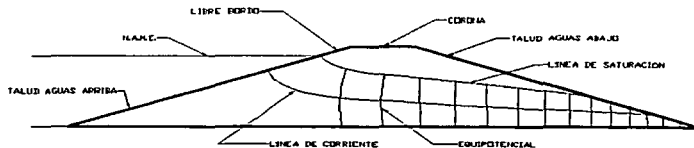


Fig. 4 Presa de tierra de sección homogénea

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.6 Descripción del Método Sueco

El método sueco es un análisis de estabilidad formal y consta de dos partes fundamentales, el trazo de la red de flujo y el análisis de círculos o arcos circulares de falla, estos dos términos se emplean indistintamente a lo largo de este trabajo.

Para aplicar el método se requiere proponer los elementos geométricos de la sección transversal y conocer las características mecánicas del material con que se construirá el bordo.

Trazo de la red de flujo. Se realiza en dos partes: cálculo y dibujo de línea de saturación y trazo de las líneas equipotenciales y tubos de corriente.

Los términos empleados se describirán a continuación:

Red de flujo. Es la representación gráfica de las equipotenciales y líneas de corriente o de flujo del escurrimiento en un medio poroso.

Línea de saturación. Es aquella línea de encima en la cual sólo actúa la presión atmosférica.

Equipotencial. Es la línea que une a todos los puntos de igual potencial, o sea que tiene la misma carga hidrostática. El potencial en el régimen laminar es igual a la suma de las cargas de posición y de presión.

Línea de corriente. Es la dirección que toman las líneas de agua que fluyen a través del material.

Bajo el título de Método Sueco se comprenden todos los procedimientos de análisis de estabilidad de taludes respecto a la falla por rotación, que se considera como un arco de circunferencia. Existen varios procedimientos para aplicar este método a los distintos tipos de suelo. (Badillo, 2001).

1. Suelos puramente cohesivos. ($\phi = 0$, $c \neq 0$)

Para este tipo de suelo se utiliza el procedimiento sencillo debido al Dr. Casagrande, que puede utilizarse tanto para estudiar la falla de base como la del pie del talud. Considérese un arco de círculo con centro en (O) y de radio (R), y que toca al talud en la corona y en la cimentación, entonces las fuerzas que causan el deslizamiento son el peso de la masa del suelo y sobrecargas que pueden actuar en la corona del talud, que en el esquema siguiente se muestra como el área ABCDA que queda dentro del arco por la distancia del centro de gravedad de la masa de suelo mencionada a la línea de proyección vertical del punto (O), a esto se le llama momento motor, y las fuerzas

resistentes son la cohesión (c) multiplicado por la longitud del arco (L) y multiplicado por el radio (R). (Badillo, 2001).

Los bordos construidos con este tipo de suelo no pueden ser muy altos, debido a que su estabilidad depende de la altura, como lo mencionó el Dr. Terzaghi cuando introdujo el concepto de altura crítica, cuyo concepto es muy útil en el estudio de empuje de tierras.

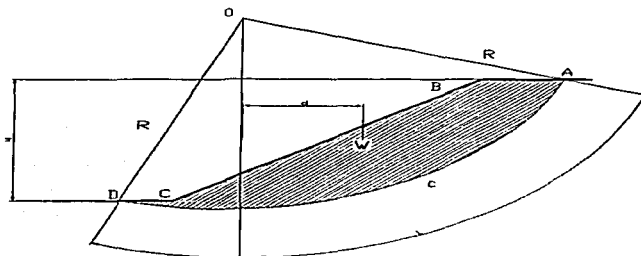


Fig. 5 Procedimiento que se sigue para aplicar el Método Sueco en un suelo puramente cohesivo

2. Suelos con cohesión y fricción ($c \neq 0$, $\phi \neq 0$)

De todos los métodos aplicables a este tipo de suelo el método de las Dovelas debido a Fellenius (1927) es el más popular, y se expone a continuación:

En primer lugar se propone un círculo de falla a elección y la masa de tierra se divide en dovelas o tajadas.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Un mayor número de dovelas es hasta cierto punto, cuestión de elección, si bien a mayor número, los resultados de análisis se hacen mas confiables, para el programa se consideró que fueran 10 dovelas. El equilibrio de cada devela debe analizarse, tomando el peso de la devela descomponiéndolo en su componente tangencial y normal. (Badillo, 2001).

2.7 Determinación de la línea de saturación

La línea de saturación es fundamentalmente una parábola. Casagrande demostró que la línea de saturación, para todos los valores del ángulo α , se adapta aproximadamente a la parábola de Koseny, para el caso en que $\alpha = 180^\circ$.

Koseny demostró matemáticamente que para el caso en que $\alpha = 180^\circ$, la parábola tiene foco en un punto A, al pie del talud aguas abajo, esta parábola intercepta a la perpendicular a ala base levantada en el foco a una distancia γ_0 de origen. (Villaseñor, 1978).

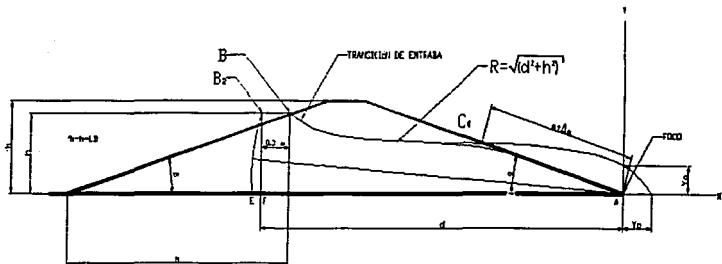


Fig. 6 Trazo de la línea de saturación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para el trazo de la línea de saturación considérese la figura 6, donde se tiene que:

B es el punto de entrada de la filtración.

B₂ es el punto donde la parábola base intersecta a la superficie del agua.

A es el pie del talud aguas abajo de la presa.

d es la distancia horizontal del punto B₂ al punto A.

h es la carga que origina la filtración.

'h es la altura del bordo.

LB es el libre bordo.

α es el ángulo interno formado por el paramento aguas abajo, y la base horizontal.

m es la proyección horizontal de la parte mojada del talud aguas arriba.

La parábola continúa teóricamente hasta interceptar la superficie del agua en el punto B₂, cuyas coordenadas con altura de la carga (h) y (d) igual al ancho de la base de la presa menos 0,7 m.

Si estos valores se sustituyen obtenemos el valor de γ_0 .

$$\gamma_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d = R - d \quad (9)$$

El valor de γ_0 puede ser determinado con facilidad gráficamente dado que es la diferencia entre la distancia real de AB₂ y su proyección horizontal, o sea:

$$\gamma_0 = R - d \quad (10)$$

$$d = 'h \operatorname{Csc} \alpha + \text{ancho de la corona} + \text{LB} \operatorname{Csc} \beta + 0,3 \quad (11)$$

El punto C₀ donde la parábola de Koseny intersecta la cara aguas abajo se encuentra fácilmente de la ecuación polar de una parábola, que es:

$$R = P / (1 - \cos \theta) \quad (12)$$

Donde:

R = Distancia radial del foco a cualquier punto de la parábola.

P = Distancia focal de la parábola.

θ = Ángulo del radio polar correspondiente al punto considerado con el eje de la parábola.

Para el caso particular del punto C_0 se tiene:

$$R = a + \Delta a = A C_0 \quad (13)$$

$$P = Y_0$$

$$\theta = \alpha$$

$$a + \Delta a = R = Y_0 / (1 - \cos \alpha) \quad (14)$$

Al tener esta última ecuación se utilizan los datos numéricos de la gráfica del Dr. Arturo Casagrande.

Los datos del Dr. Arturo Casagrande del cuadro siguiente, a partir del valor de 45° hasta $15,95^\circ$ para α están extrapolados del gráfico publicado en el libro del Ing. Jesús Villaseñor en 1978.

La extrapolación se puede realizar gráficamente infiriendo la pendiente, o bien, utilizando procedimientos estadísticos como la regresión; cabe aclarar que con cualquiera de las dos maneras hay cierto grado de incertidumbre (no significativa), sobre todo por la apreciación por parte de la persona que realice la extrapolación, finalmente este trabajo se realizó utilizando el método gráfico.

Tabla 3. Valores de $\Delta a/(a + \Delta a)$ en relación a α

Valores de α en grados	$\Delta a / (a + \Delta a)$
180	0,0000
150	0,1000
120	0,1750
90	0,2500
60	0,3005
45	0,3193
27,6	0,3309
21,8	0,3338
18,43	0,3359
15,95	0,3375

Fuente: Cuevas Madrid, 2002

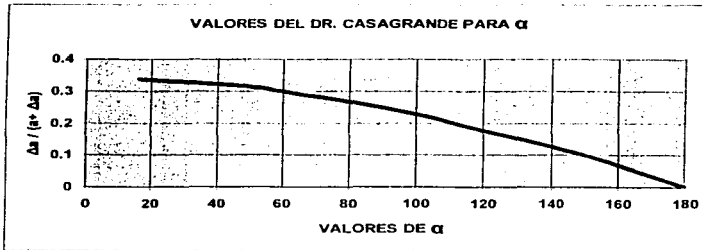


Fig. 7 Valores del Dr. Arturo Casagrande para α

Supongamos que el ángulo de nuestro talud α es de 21,8°, entonces el valor del Dr. A. Casagrande es 0,3338, entonces tenemos:

$$\Delta a/(a + \Delta a) = 0,3338 \quad (15)$$

$$\Delta a/R = 0,3338 \quad (16)$$

$$\Delta a = 0,3338 R \quad (17)$$

$$R - \Delta a = a \quad (18)$$

Donde "a" es el valor donde cae tangencialmente la línea de saturación en el talud de aguas abajo.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2.8 Análisis del círculo de falla

El Método Sueco para el análisis de estabilidad de taludes, se basa en la suposición de que la línea de falla de deslizamiento sea aproximadamente un arco de círculo correspondiente a un cilindro, como ya se dijo anteriormente.

El método es básicamente gráfico y consiste en trazar arcos de círculo a través del talud y la cimentación, y obtener factores de seguridad contra el deslizamiento.

Muchos autores recomiendan que deben analizar cuando menos tres círculos de falla en cada talud:

- a) Círculo tangente al desplante
- b) Círculo que pasa por el pie del talud y que comprende parte de la cimentación.
- c) Círculo que abarca parte de la cimentación y de la corona.

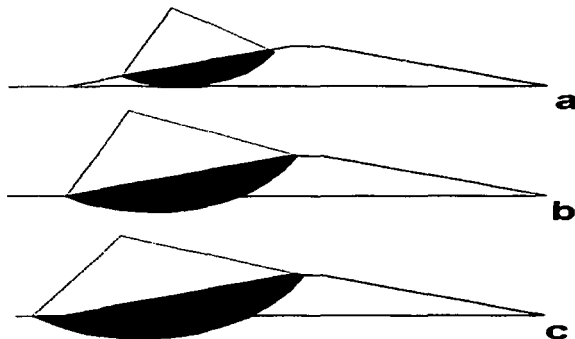


Fig. 8 Círculos de falla que usualmente se analizan

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

O bien, en función del talud propuesto se determinan los ángulos alfa (α) y beta (β) para obtener el centro del círculo de falla crítico según el criterio del Dr. Taylor.

Tabla 4. Valores de α y β

Talud	Angulo del Talud	α	β
2,0:1	26° 34'	25° 30'	34° 30'
2,5:1	21° 48'	25° 00'	34° 45'
3,0:1	18° 26'	25° 00'	35° 00'
3,5:1	15° 57'	25° 00'	35° 15'

Fuente: Arteaga, 1985.

La tabla 4 contiene los valores de los ángulos α y β para los taludes más comunes que se utilizan en bordos de almacenamiento de agua.

2.8.1 Condiciones de análisis

Según Arteaga el análisis de la estabilidad de los tres círculos de falla o del círculo de falla crítico; debe realizarse en el talud de aguas arriba y en el talud de aguas abajo, en condición de saturación y de no saturación, es decir a presa llena y a presa vacía, cabe mencionar que todas las fallas de importancia reportadas por el desplazamiento del talud de aguas arriba han ocurrido como consecuencia de un vaciado rápido, pero las fallas por desplazamiento del talud aguas arriba nunca han causado el colapso total de la presa o pérdida de agua en el almacenamiento y por esta razón no se realizaron las redes a presa vacía, pero frecuentemente han causado situaciones de peligro al tapar conductos, galerías, etc., pero que al repararlas ya no causan peligro (Badillo, 2001). Así que, éste trabajo está enfocado más al talud de aguas abajo en cuestión de los análisis ya que ahí es donde termina la línea de saturación y además actúan todas las fuerzas, incluyendo las fuerzas de filtración que obran

en sentido desfavorable a la estabilidad del talud y de las que se hablará a continuación.

2.9 Fuerzas de filtración

Las fuerzas de filtración se deben a un cambio de carga total (presión de más altura), debido a la filtración del flujo del agua. En un medio poroso uniforme, la fricción obra en los granos de modo que en un tramo en el cual la velocidad sea constante puede considerarse uniformemente distribuida en su longitud; si se considera el caso de un permeámetro, resulta que su valor por unidad de volumen del medio poroso es igual al producto del peso volumétrico del agua multiplicado por el gradiente hidráulico y que su dirección es la de la velocidad media de la corriente (Guerrero, 1948). En otras palabras, el agua que se filtra a través de la cortina aumenta el peso sumergido del suelo con la fuerza inicial de filtración con el peso efectivo resultante. Al continuar el agua su recorrido de filtración, continúa ejerciendo fuerzas de filtración en la dirección de la corriente que son proporcionales a las pérdidas por fricción por unidad de distancia. Cuando el área de la sección está restringida, la velocidad de filtración aumenta en forma correspondiente. (SARH, 1976). En las presas de tierra todas las fuerzas de filtración obran en sentido desfavorable a la estabilidad del talud aguas abajo (Guerrero, 1948).

La resultante J en kg (que se debe multiplicar por 1 m de tajada para obtener kg), de estas fuerzas de filtración tiene como magnitud la suma de:

$$J = \omega \times i \quad (19)$$

Donde:

J = Fuerzas de filtración en kg/m³.

ω = Peso específico del agua 1000 kg/m³.

$$i = \Delta h/L \text{ (Adimensional)} \quad (20)$$

En la cual:

Δh = El cociente entre la altura de la carga total entre el número de caídas de potencial.

L = Longitud del cuadrado menor de la red de flujo para obtener el gradiente mayor dentro de la red de flujo y en consecuencia la velocidad máxima.

La dirección de esta resultante es perpendicular a las equipotenciales (Marsal, 1975). Y como en el talud aguas abajo en donde se analizan éstas fuerzas, las equipotenciales son casi perpendiculares respecto a la base del bordo, por lo tanto se pueden sumar a las fuerzas tangenciales en la ecuación del Factor de Seguridad al Desplazamiento, como se verá mas adelante.

2.10 Factor de seguridad contra el deslizamiento (FSD)

El factor de seguridad de cada arco se obtiene sumando todas las fuerzas que se oponen al deslizamiento a lo largo del arco y dividiendo entre la zona de las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento.

La magnitud de estas fuerzas depende de que tengan condiciones de saturación o no saturación

En el caso de no saturación, es decir que la subpresión y las fuerzas de filtración son nulas, las fuerzas que se oponen al deslizamiento son la suma de las fuerzas normales multiplicadas por la tangente del ángulo de fricción interna (ϕ), más el valor de la cohesión en toda la longitud del arco. Las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento son las fuerzas tangenciales. De acuerdo

con lo anterior el factor de seguridad contra el deslizamiento está dado por la fórmula:

$$FSD = (\sum N \tan\phi + x cs) / (\sum T) \geq 1,5 \quad (21)$$

Donde:

$\sum N$ = Suma de fuerzas normales (componente expresado en toneladas que se opone al deslizamiento multiplicado por el peso volumétrico del material).

$\tan\phi$ = Tangente del ángulo de fricción interna del material.

x = Longitud del arco de círculo en m.

cs = Cohesión en condiciones de no saturación en ton/m².

$\sum T$ = Suma de las fuerzas tangenciales (componente expresado en toneladas que provoca el deslizamiento multiplicado por el peso volumétrico del material en toneladas).

Para condiciones de saturación las fuerzas que se oponen al deslizamiento son la suma de las fuerzas normales menos las fuerzas de subpresión multiplicadas por la tangente del ángulo de fricción interna más la cohesión de toda la longitud del arco. Las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento son las tangenciales y las fuerzas de filtración, siempre y cuando se trate del talud aguas abajo, ya que en el talud aguas arriba actúan en sentido favorable de la estabilidad pero no se toman en cuenta para no reducir la robustez del bordo y no afectar las condiciones de las otras fuerzas, pues como menciona el Dr. Badillo (2001), el deslizamiento del talud aguas arriba nunca ha colapsado una obra. De acuerdo con lo anterior el factor de seguridad por el deslizamiento está dado por la siguiente fórmula:

$$FSD = ((\sum N - \sum Sp) \tan\phi + x ch) / (\sum T + \sum j) \geq 1,5 \quad (22)$$

Siendo:

$\sum Sp$ = Suma de las fuerzas de subpresión (área de la subpresión por el peso volumétrico del agua).

ch = Cohesión en condiciones húmedas en t/m^2 .

$\sum j$ = Suma de las fuerzas de filtración J (componente expresado en toneladas que provoca la fuerza de filtración multiplicado por el peso volumétrico del agua dentro del arco de falla).

El Método Sueco tiene una gran aceptación, debido a que da soluciones correctas para conocer el factor de seguridad de los terraplenes. La superficie de falla se aproxima muy bien a un arco de círculo y la experiencia ha demostrado que el cálculo de la estabilidad de taludes empleando el Método Sueco a dado resultados satisfactorios. (Arteaga, 1985).

Según Arteaga para la resolución de estabilidad de taludes por este método, se parte de la suposición que la ruptura se verifica según una superficie deslizante en el cual se han sobrepasado las condiciones de equilibrio estático y además de:

- a) Que la superficie de falla es la que dentro de la cortina corresponde a un cilindro de revolución de eje horizontal, efectuándose el deslizamiento del material que encuentra en la superficie de falla como si fuera una masa sólida que gira alrededor del eje del cilindro, produciendo simultáneamente iguales desplazamientos en todos los puntos de la superficie del desplazamiento.
- b) Que en todos y cada uno de los puntos de la superficie de falla, obra una carga que corresponde al peso total de la columna vertical que

comprende al material de la sección que queda incluido desde su base en la superficie de falla, hasta su remate en el talud exterior.

Entonces el peso de la dovela en el círculo de falla queda así:

$$dw = \gamma h dx \quad (23)$$

Donde:

dw = Peso de la dovela de ancho diferencial.

γ = Peso volumétrico del material.

h = Altura promedio del total de dovelas en que se dividió el círculo de falla, se obtiene al dividir cada dovela por la mitad con una línea longitudinal como se muestra en la figura 9 donde la dovela está partida por la mitad y que la acotación con la letra h sale de la parte central de la dovela, después se toman las dimensiones con escalímetro de estas líneas longitudinales para introducir las al programa y que éste calcule el promedio.

dx = Longitud diferencial del arco de falla.

El peso de la columna se puede descomponer en una normal que pase a través del centro de rotación y en una tangencial perpendicular a la anterior, teniendo por valor cada una:

$$dn = dw \cos \phi \quad (24)$$

$$dt = dw \sin \phi \quad (25)$$

Sustituyendo el valor de dw en las ecuaciones anteriores se tiene:

$$dn = \gamma h dx \cos \phi \quad (26)$$

$$dt = \gamma h dx \sin \phi \quad (27)$$

Que son los valores de los esfuerzos normales y tangenciales que se obtienen de la dovela, por lo tanto los valores tangenciales como normales a lo largo de todo el círculo de falla, están representados por:

$$N = \int_0^x \gamma \, h \, dx \, \text{Cos}\phi \quad (28)$$

$$T = \int_0^x \gamma \, h \, dx \, \text{Sen}\phi \quad (29)$$

Como se sabe, la cohesión del material obra también en sentido favorable a la estabilidad y su valor considerando un área diferencial, $c \, dx$ por lo que la fuerza total será:

$$F = \int_0^x c \, dx = cx \quad (30)$$

Donde:

c = Cohesión.

x = Longitud del arco del círculo (el ángulo en radianes por el radio).

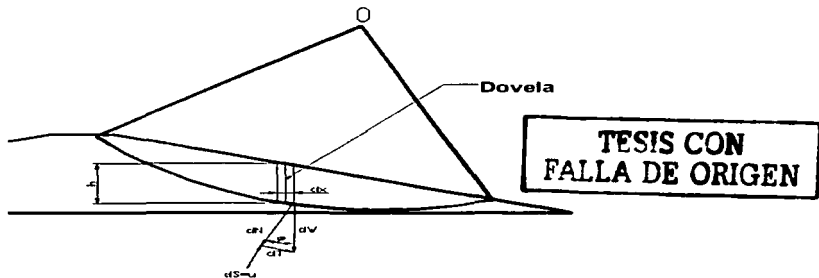


Fig. 9 Método Sueco

Si la resistencia empírica al corte del suelo se representara por la expresión de la ley empírica de Coulomb y experimental de Mohr, el total de esfuerzos pasivos o resistentes vale:

$$Fr = F + G_n \, \text{Tan}\phi \quad (31)$$

Donde:

Fr = Esfuerzos resistentes.

φ = Angulo de fricción interna.

Gn = Esfuerzo Normal.

Si en la ecuación 31 se sustituyen las ecuaciones 28 y 30, se obtiene:

$$Fr = cx + \left(\int_0^r \gamma \, h \, dx \cos \varphi \right) \tan \varphi \quad (32)$$

Siendo el factor de seguridad expresado por:

$$FSD = \text{Fuerzas resistentes} / \text{Fuerzas motoras} \quad (33)$$

Sustituyendo las ecuaciones 29 y 32 en la ecuación 33 obtendríamos:

$$FSD = [cx + \left(\int_0^r \gamma \, h \, dx \cos \varphi \right) \tan \varphi] / \left(\int_0^r \gamma \, h \, dx \sin \varphi \right) \quad (34)$$

Pero como se sabe, el caso crítico se presenta cuando el material está saturado, es decir, cuando se están ejerciendo esfuerzos de subpresión a lo largo de la superficie de la falla. La subpresión obra sobre la superficie del círculo de falla en sentido opuesto a los componentes normales del peso de los materiales, por lo que, por medio de la red de flujo es posible conocer dicha subpresión. En el material homogéneo se obtiene la disminución que hay que hacer al valor de las normales.

El valor de la subpresión que obra sobre la superficie es:

$$ds = u \, dx \quad (35)$$

El valor total para todo el círculo es:

$$S = \int_0^r u \, dx = \int_0^r h_w \, \omega \, dx \quad (36)$$

Donde:

u = Presión de poro, calculada de la red de flujo.

dx = Longitud diferencial del arco de falla.

h_w = Altura promedio del agua dentro de las dovelas.

ω = Peso específico del agua 1000 kg/m^3 .

Y de la misma manera el valor de las fuerzas de filtración es:

$$j = \omega \times i \quad (37)$$

Donde:

j = Fuerzas de filtración en kg/m^2 .

ω = Peso específico del agua 1000 kg/m^3 .

$$i = \Delta h / L \text{ (Adimensional)} \quad (38)$$

En la cual:

Δh = El cociente entre la altura de la carga total entre el número de caídas de potencial.

L = Longitud del cuadrado menor de la red de flujo para obtener el gradiente mayor dentro de la red de flujo y en consecuencia la velocidad máxima.

$$\int_0^L \omega \times i \times h_w \times dx \quad (39)$$

Como $\omega \times i = j$ se tiene lo siguiente:

$$\int_0^L j h_w \times dx = J \quad (40)$$

Donde:

J = Magnitud de las fuerzas de filtración en kg .

j = Fuerzas de filtración.

h_w = Altura promedio del agua dentro de las dovelas.

dx = Longitud diferencial del arco de falla.

Nótese que la diferencia entre J y j son las unidades, ya que la primera es la magnitud total de las fuerzas de filtración multiplicada por el área bruta

donde actúan dichas fuerzas y este es el dato que se ocupa en la ecuación del factor de seguridad contra el deslizamiento y la segunda es la fuerza de filtración por unidad de volumen, este dato se ocupa para obtener la magnitud J.

Entonces el factor de seguridad para condiciones críticas en el talud aguas arriba será:

$$FSD = [cx + \left(\int_0^l \gamma h \cos\phi \, dx - \int_0^l h_w \omega \, dx \right) \tan\phi] / \left(\int_0^l \gamma h \sin\phi \, dx \right) \quad (41)$$

Y para el talud aguas abajo se propone que sea así:

$$FSD = [cx + \left(\int_0^l \gamma h \cos\phi \, dx - \int_0^l h_w \omega \, dx \right) \tan\phi] / \left(\int_0^l \gamma h \sin\phi \, dx + \int_0^l \omega i h_w \, dx \right) \quad (42)$$

Para calcular el factor de seguridad contra el deslizamiento con el programa de cómputo se tienen que tomar en consideración los siguientes puntos con el fin de evitar errores en los resultados.

- 1) Que el círculo de falla se debe dividir en un máximo de 10 dovelas, ya que así fue como se estableció en el programa de cómputo; la división del arco se realiza dibujando una línea dividida en parte iguales según el número de dovelas por debajo de la base del bordo, luego las divisiones se proyectan hacia el arco.
- 2) Que al introducir la longitud del arco de falla para calcular la subpresión se verifique que esa longitud abarque sólo material saturado y para las fuerzas tangenciales que sólo tenga la longitud donde dichas fuerzas sean desfavorables, esto se puede corroborar trazando las radiaciones hacia el centro del círculo de falla y observando el cambio de dirección de las radiaciones con respecto a las divisiones de las dovelas.

- 3) Que la altura de la dovela que se pide en las ecuaciones del cálculo de las fuerzas que participan en el FSD, es la altura promedio del total de las dovelas incluyendo los extremos cuyos valores son iguales a cero.
- 4) El valor del gradiente que se pide en el cálculo de las fuerzas de filtración es un gradiente promedio de cuatro valores que estén dentro del área del círculo de falla, se toman los dos más grandes y los más pequeños.

2.11 Factor de Seguridad contra la Tubificación (FST)

El fenómeno de la tubificación puede definirse como el movimiento de material de la cimentación o de la cortina por la velocidad del agua de filtración al salir del suelo que constituye la presa. En otras palabras, el fenómeno se presenta cuando las filtraciones a través de un suelo se verifican con mayores velocidades de un cierto límite, al cual se le denomina velocidad crítica. (Villaseñor, 1978).

Debido al arrastre de las partículas sólidas por las altas velocidades se van formando en la cimentación o en la cortina verdaderos túneles, por los que el agua fluye frecuentemente. Esto es más apreciable en los puntos donde el agua aflora, en las cuales se producen acumulaciones de partículas sólidas en las proximidades de los túneles. (Villaseñor, 1978).

En las presa de tierra, para que la estructura que dé al margen de los efectos producidos por la tubificación, se introduce un factor de seguridad que se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$FST = (i_{crit} / i) \geq 4 \quad (43)$$

Donde:

i = Gradiente hidráulico del flujo que atraviesa el material.

$i_{crit.}$ = Gradiente crítico, que se calcula donde están las velocidades máximas en la red de flujo.

$$i_{crit.} = (\gamma_{sat.} - \omega) / \omega \quad (44)$$

Donde:

$\gamma_{sat.}$ = Peso Volumétrico de material Saturado en kg/m^3 .

ω = Peso específico del agua.

Para calcular este factor de seguridad se hace uso de la red de flujo ya que de ésta son obtenidos los gradientes.

$$i = \Delta h / L \text{ (Adimensional)} \quad (45)$$

En la cual:

Δh = El cociente entre la altura de la carga total entre el número de caídas de potencial.

L = Longitud del cuadrado menor de la red de flujo para obtener el gradiente mayor dentro de la red de flujo y en consecuencia la velocidad máxima.

2.12 Métodos para mejorar la estabilidad de taludes

A continuación se indican algunos métodos que se recomiendan y que han comprobado su valor práctico para mejorar la estabilidad de taludes, cuyas condiciones de estabilidad originales no sean satisfactorias.

a) Tender taludes.

A primera vista quizá pudiera pensarse que esta solución sea la más obvia y sencilla en la práctica. Sin embargo, ha de tomarse con el debido cuidado desde el punto de vista teórico y muchas veces es irrealizable prácticamente hablando.

Si el terreno que constituye el talud es puramente friccionante la solución es la indicada, la estabilidad de estos suelos es fundamentalmente cuestión de inclinación en el talud. En suelos cohesivos, por el contrario, la estabilidad del talud está condicionada sobretodo por la altura del mismo y la ganancia al tender el talud es siempre escasa y a veces nula y finalmente en los suelos con cohesión y con fricción, el tender el talud producirá un aumento en la estabilidad en general.

b) Empleo de bermas laterales o frontales.

Se denomina bermas a masas generalmente del mismo material que el del propio talud, que se colocan adecuadamente en el lado exterior del mismo a fin de aumentar su estabilidad.

En general una berma produce un incremento en la estabilidad por dos motivos.

1.- Por su propio peso; en la parte que queda hacia fuera de la vertical que pasa por el centro del círculo de falla, disminuyendo el momento motor.

2.- Aumenta el momento resistente, por el incremento en la longitud del arco de falla por efecto de la propia berma.

En los cálculos prácticos ha de tenerse en cuenta que la presencia de la berma modifica la ubicación de la superficie de falla crítica, por lo que su colocación exige un nuevo cálculo de la estabilidad del talud protegido por la berma. La experiencia ha demostrado que es una buena base para los tanteos el suponer el ancho de una berma del orden de la mitad de la base del terraplén y una altura tal que el peso de la berma dé un momento igual al requerido para alcanzar en el talud original el factor de seguridad deseado. A

partir de este principio se procederá por tanteos hasta fijar la berma mínima que cumpla su cometido.

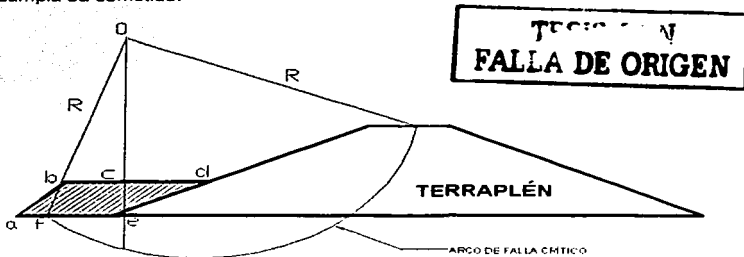


Fig. 10 Uso de bermas para mejorar la estabilidad de un talud

c) Empleo de materiales estabilizantes.

El fin de la solución en estudio es mejorar las cualidades de resistencia de los suelos mezclándoles algunas sustancias que al producir una cementación entre las partículas del suelo natural o una mejora de sus características de fricción, aumenten su resistencia en los problemas prácticos. Las sustancias más empleadas han sido cementos, asfaltos y sales químicas. Sin embargo, en la práctica estos procedimientos resultan costosos, por lo que su uso es limitado.

d) Empleo de muros de retención.

Esta solución cuando se aplica con cuidado, es correcta, aunque en general es costosa. Para aplicar esta solución se deben tomar algunas precauciones como las siguientes:

En primer lugar ha de cuidarse que la cimentación del muro quede bajo la zona de suelo movilizada por la falla hipotética del talud, pues se han

reportado casos en que el muro falla por rotación por ejemplo, se moviliza en conjunto con el suelo resultando totalmente inútil.

En segundo lugar, es preciso tomar precauciones muy especiales en lo referente al drenaje, dotando al muro en su paramento interno de filtros de material permeable, que canalicen a las aguas hacia las salidas que se proyecten a través del muro. En suelos con contenido apreciable de finos plásticos es preciso tener muy presente la posibilidad de que el material del talud se sature, en cuyo caso disminuirá fuertemente su cohesión aparente aumentando los empujes contra la estructura. Esto ha sido la principal causa de fallas en muros de retención.

e) Empleo de filtros

Para mejorar la estabilidad de los taludes también se pueden drenar ocupando canales y filtros, en los bordos de almacenamiento se utilizan los filtros, un filtro es un dren con características especiales, es una estructura porosa graduada por la cual se hace atravesar un líquido para retener las partículas sólidas en suspensión y disminuir el efecto de las fuerzas de subpresión, pues logra aumentar la permeabilidad unas 10 veces. (Del Castillo 2001).

Las funciones del filtro son:

- 1.- Neutralizar, contrarrestar, o disminuir las fuerzas de filtración y evitar que se presente el gradiente crítico en la cortina o en la cimentación de una estructura.

- 2.- Evitar que las partículas finas del suelo que constituyen el material impermeable de los bordos se escapen, y se permita la salida del agua en la

zona donde se coloca el filtro, que normalmente es al pie del talud de aguas abajo.

3.- Disminuir al máximo la presión de poro en la zona donde se coloca el filtro.

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

- a) Computadora con lector de discos de 3 ½".
- b) Lenguaje de Programación
 - Visual Basic 6.0.
- c) Paquetería
 - AutoCAD versión 14 o superior.
 - Office XP.
- d) Material de dibujo
 - Juego de escuadras.
 - Transportador.
 - Compás.
- e) Programa CALESTT 1.0
 - Se compone de 2 discos de 3 ½", uno contiene el programa CALESTT en sí, así como los archivos de extensión *.wmf* y el otro disco contiene las redes de flujo en AutoCAD versión 2002.

3.2 Métodos (fase del diseño del programa):

- 1.- Planteamiento de las ecuaciones a resolver, Factores de Seguridad contra el Deslizamiento y la Tubificación, determinación de la Línea de Saturación, y la determinación de la magnitud de las Fuerzas de Filtración, de las Normales, de las Tangenciales y la Subpresión.
- 2.- Selección de la plataforma en que va a trabajar el programa. (Sistema Operativo)

- 3.- Selección del lenguaje adecuado para llevar a cabo el programa, en base a las ventajas que ofrezca, tales como facilidad de operar, que exista bibliografía clara, y que sea actual.
- 4.- Diseño teórico del programa, en otras palabras, definir cuantos formularios serán necesarios, y otras funciones que deba realizar el programa.
- 5.- Diseño de la interfaz del usuario, es decir la parte del programa que observa y utiliza el usuario.
- 6.- Codificación del programa: Introducción de los algoritmos al lenguaje de programación seleccionado, en este caso Visual Basic 6.0.
- 7.- Prueba del programa, se refiere a comprobar los resultados de las ecuaciones.
- 8.- Documentación del programa, la cual consiste en la realización del procedimiento para el usuario el cual a continuación se presenta.

3.3 Procedimiento para calcular la estabilidad de taludes con la ayuda del programa de cómputo

- 1.- Configurar el área de pantalla a 1024 x 768 píxeles.

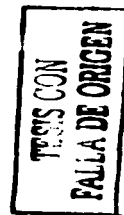
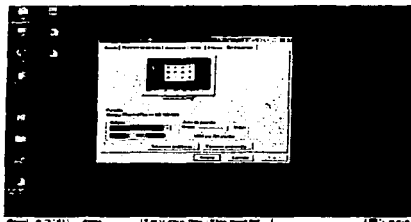
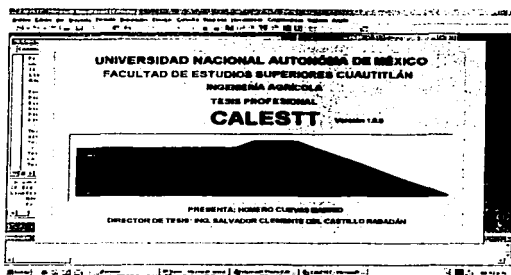


Fig. 11 Configuración del área de pantalla

- 2.- Introducir el disco de 3 1/2" con la leyenda CALESTT.
- 3.- Copiar el archivo CALESTT y guardarlo en su disco duro, y dejarlo en la unidad A, mientras esté ocupando CALESTT ya que también contiene los archivos de extensión .wmf.
- 4.- Abrir el programa CALESTT del cual la pantalla de inicio es la siguiente.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 12 Pantalla de inicio de CALESTT

- 5.-Después de aproximadamente 5 segundos aparecerá la pantalla correspondiente al cálculo de la línea de saturación.
- 6.-Introduzca la información del bordo del cual quiere calcular la línea de saturación y oprima el botón que dice "Cálculo de la línea de Saturación", posteriormente oprima el botón con la leyenda "Mostrar Red de Flujo" si en los archivos de AutoCAD existe una red de flujo con las dimensiones que usted propuso la pantalla se verá así, de lo contrario; si no la hay; al oprimir el botón "Mostrar Red de Flujo" saldrá en la pantalla un recuadro con la leyenda "No existe una red de flujo con esas dimensiones, por lo que usted deberá dibujarla" y dé clic en aceptar.

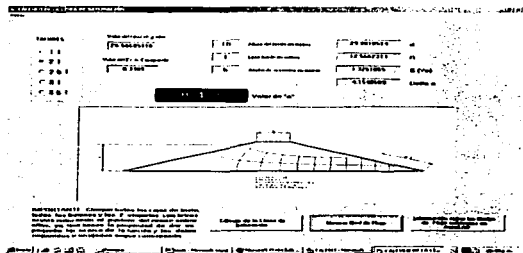


Fig. 13 Pantalla del cálculo de la línea de saturación

7.- Para saber que redes existen en AutoCAD y su ruta de acceso, usted puede pulsar en el botón "Información de las redes de flujo existentes en AutoCAD" saldrá un cuadro de diálogo con la información, o bien, puede ver la Tabla no. 5 para ver si se cuenta con una red con las medidas que usted especificó, de lo contrario deberá dibujarla.

8.- La ruta de acceso a los dibujos de AutoCAD es la siguiente; se toma el disco de 3 1/2", al abrirlo encontrará archivos con los siguientes nombres por ejemplo, 45-9, 26-8, 18-6, 15-7, en los cuales el significado del primer número es el ángulo del talud en grados, por ejemplo, 45 corresponde al talud 1:1, el 26 al talud 2:1, 22 al talud 2,5:1, el 18 al talud 3:1 y el 15 al talud 3,5:1 y el número después del guión es la altura del bordo.

9.- En el caso que en AutoCAD exista una red de flujo con las dimensiones propuestas, para imprimirla introduzca disco de las redes de flujo, abra el archivo correspondiente y pulse imprimir, entonces el cuadro de diálogo debe estar como se muestra a continuación, o sea, en el área de trazado debe estar

en extensión, la escala en milímetros y a escala de 1:1 y la impresión centrada.

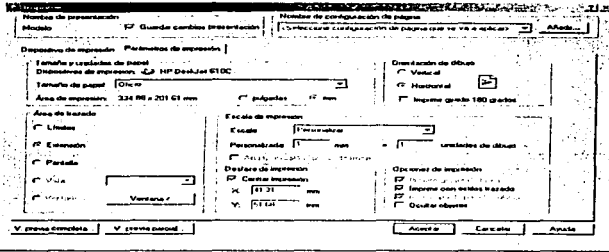


Fig. 14 Cuadro de diálogo de impresión de AutoCAD

10.- En red impresa o en la dibujada se deben trazar ayudándose de escuadras, escalímetro, transportador y compás los círculos de falla y las dovelas para así obtener las medidas pertinentes para obtener la altura promedio y longitudes de los arcos de falla.

11.- Abra el menú y dé clic en Factores de Seguridad, introduzca la información que se requiere (ver el apartado 3.3.1) y se verá como sigue:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

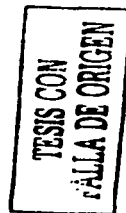
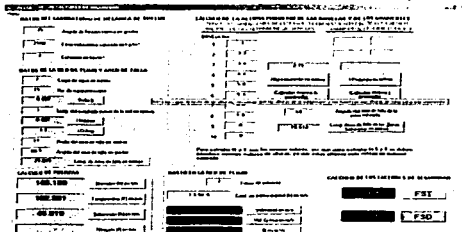


Fig.15 Pantalla del cálculo de los factores de seguridad

Tabla 5 Dimensiones que poseen las redes dibujadas en AutoCAD

Talud	LB	Ancho de la Corona *	Altura del Bordo
1:1	1,0 m	5,0 m	De 5,0 a 10,0 m
2:1	1,0 m	5,0 m	De 5,0 a 10,0 m
2,5:1	1,0 m	5,0 m	De 5,0 a 10,0 m
3:1	1,0 m	5,0 m	De 5,0 a 10,0 m
3,5:1	1,0 m	5,0 m	De 5,0 a 10,0 m

Cuevas Madrid, 2003

* Estas redes también podrían servir para bordos con anchos de corona de 4 y 6 metros según el análisis estadístico que más adelante se presenta, pero esto es a reserva del proyectista.

3.3.1. Recomendaciones para el uso del programa de cómputo

a) Relativas a la información que se requiere en el programa.

Las dimensiones que se piden en metros dentro del programa se obtienen de la magnitud dibujada (MD) en centímetros multiplicada por la escala de trabajo (ET) y dividida entre 100 para obtener metros, o sea: $(MD \times ET) / 100$ para obtener los datos en metros en el caso de que no se cuente con escalímetro, si se cuenta con éste simplemente se tomarán las dimensiones con la escala adecuada.

Es importante aclarar que debe tener mucho cuidado en las alturas promedio de las zonas saturadas y las no saturadas, así mismo se debe tener

mucho cuidado con las longitudes de los arcos de falla donde actúan las fuerzas.

Las alturas de dovela que se toman en consideración para las fuerzas normales y tangenciales es la altura neta de cada dovela, en cambio para las fuerzas de filtración y subpresión es la altura hasta donde llega el agua dentro de cada dovela.

La longitud del arco de falla donde actúan las fuerzas normales y la cohesión no es la misma para las tangenciales, las fuerzas de filtración y la subpresión; pues hay una parte del arco donde las tangenciales son favorables a la estabilidad del talud y la subpresión así como las fuerzas de filtración sólo actúan en zonas saturadas, así que puede decir la longitud del arco de falla para estas fuerzas es generalmente menor que para las tangenciales y normales, esta es la razón por la que dentro del programa hayan dos secciones para calcular las longitudes de los arcos de falla; una para áreas secas y otra para saturadas

Entre las fuerzas tangenciales y normales hay una ligera diferencia entre las longitudes del arco de falla de acción, porque las normales actúan en una sola dirección en todo el círculo de falla y las tangenciales no, por lo que se recomienda trazar en las radiaciones del pie de la dovela hacia el centro del círculo de falla para observar el cambio de sentido de las fuerzas tangenciales, las fuerzas tangenciales favorables a la estabilidad del talud se ven generalmente en las dovelas que están al pie del bordo, entonces se concluye que a la longitud del arco de falla total se le resta la sección donde las fuerzas tangenciales obran a favor de la estabilidad.

Todo esto se debe realizar porque las fuerzas tanto las tangenciales, la subpresión y las de filtración saldrían muy sobradas dando como resultado factores de seguridad muy bajos.

En resumen:

Para calcular las fuerzas normales, se ocupan las alturas netas de las dovelas, así como la longitud total del arco de falla.

Para calcular las fuerzas tangenciales se procede como las normales en cuanto a la altura de las dovelas, pero se le debe restar al total de la longitud del arco de falla la sección del arco donde las fuerzas tangenciales son favorables.

Para calcular la subpresión las alturas que se manejan son las del agua dentro de la dovela, el comportamiento de estas alturas es que, en las dovelas del fondo la altura neta de la dovela es igual a la altura del agua puesto que está saturada, y el nivel del agua va disminuyendo gradualmente en las dovelas hasta llegar a la parte superior.

Para calcular las fuerzas de filtración se procede igual que en la subpresión, además de la condicionante que éstas sólo se calculan en el talud de aguas abajo.

Y finalmente para calcular el FSD donde va implícito el cálculo de la cohesión la longitud del arco de falla es la misma que para las fuerzas normales.

b) Relativas al funcionamiento del programa.

Las cajas de texto con fondo blanco son para introducir datos, las cajas de texto que son de color pastel (lila) contendrán resultados parciales, y las cajas de texto de color oscuro (negro) son resultados finales.

Este programa se puede manejar con mouse o sin él, pues los botones tienen un carácter subrayado con el fin de poderse activar como en cualquier otro programa de ambiente Windows (Alt + El carácter subrayado) y se pueden usar las teclas de navegación (↑↓) en el cuadro de opciones de taludes, además con el tabulador se pueden ir seleccionando las cajas de texto y botones en el orden en el que se deben ir introduciendo y calculando los datos, si no se sigue ese orden se podrá causar errores en el programa de los cuales muchos se corrigen sólo dando clic en "Aceptar" en las cajas de diálogo que aparecen describiendo el error, pero si esto no resulta o se llega a "trabar" se debe reiniciar el programa.

También cuenta con la cualidad de que cuando el puntero del mouse se coloca en cualquier caja de texto o en un botón da un pequeño tip de cómo se debe proceder en ese sitio o que información se requiere.

IV RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados y análisis

Dado que el contenido de redes de flujo en AutoCAD de las que se auxilia CALESTT está limitado a bordos que tienen la corona de 5 m de ancho, y que en el alcance del método se menciona que se puede aplicar a bordos que tengan el ancho de la corona entre los 4 y 6 m, es porque se hizo un análisis estadístico que involucra el porcentaje de diferencia relativa entre los valores de ancho de corona de 4 m, 5 m y 6 m con el fin de hacer más útil el limitado número de redes de flujo. Los resultados de dicho análisis se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 6 Porcentajes de diferencia relativa (D.R) entre resultados de "a" con diferentes anchos de corona

CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE DIFERENCIA RELATIVA (D.R)**						
MEDIDAS DEL BORDO		VALORES DE a			% DE D.R	
TALUD	ALTURA m	CORONA DE 5 m	CORONA DE 6 m	CORONA DE 4 m	D.R ENTRE 5 Y 6 m	D.R ENTRE 5 Y 4 m
1:1	5	1,32	1,23	1,42	-7,06	-7,30
1:1	6	1,88	1,75	1,98	+6,09	-6,25
1:1	7	2,44	2,31	2,58	+5,47	-5,58
1:1	8	3,04	2,89	3,21	+5,06	-5,44
1:1	9	3,67	3,5	3,85	+4,74	-4,79
1:1	10	4,32	4,13	4,44	+4,50	-4,30
1:2	5	2,67	2,54	2,82	+4,99	-5,46
1:2	6	3,72	3,56	3,9	+4,40	-4,72
1:2	7	4,83	4,64	5,04	+4,01	-4,26
1:2	8	5,99	5,77	6,22	+3,74	-3,77
1:2	9	7,18	6,93	7,43	+3,34	-3,42
1:2	10	8,39	8,13	8,67	+3,15	-3,28
1:2,5	5	3,44	3,29	3,6	+4,46	-4,65
1:2,5	6	4,77	4,58	4,97	+4,06	-4,11
1:2,5	7	6,17	5,95	6,4	+3,63	-3,66
1:2,5	8	7,62	7,37	7,88	+3,34	-3,35
1:2,5	9	9,11	8,84	9,39	+3,01	-3,03
1:2,5	10	10,63	10,34	10,93	+2,77	-2,78
1:3	5	4,23	4,07	4,41	+3,86	-4,17
1:3	6	5,84	5,64	6,06	+3,48	-3,70
1:3	7	7,54	7,3	7,79	+3,23	-3,26
1:3	8	9,29	9,03	9,87	+2,84	-2,97
1:3	9	11,08	10,8	11,39	+2,56	-2,76
1:3	10	12,91	12,6	13,23	+2,43	-2,46
1:3,5	5	5,09	4,87	5,24	+3,63	-3,69
1:3,5	6	6,95	6,73	7,18	+3,22	-3,26
1:3,5	7	8,94	8,69	9,2	+2,84	-2,87
1:3,5	8	10,99	10,71	11,28	+2,58	-2,60
1:3,5	9	13,09	12,79	13,41	+2,32	-2,42
1:3,5	10	15,23	14,91	15,57	+2,12	-2,21

Cuevas Madrid, 2003

$$** \% D.R. = ((Val 1 - Val 2) / ((Val 1 + Val 2)/2)) \times 100$$

Los promedios de porcentaje de diferencia relativa son +3,77 y -3,88 respectivamente.

De lo anterior podemos notar que el porcentaje de diferencia relativa va disminuyendo mientras que la altura del bordo aumenta y así mismo mientras lo taludes van siendo más tendidos; por otra parte los signos negativos en los valores de diferencia relativa de la longitud de "a" con una corona de 4 m

indican que son menores a los valores de "a" con una corona de 5 m y por el contrario los signos positivos indican un valor superior teniendo una corona de 6 m.

En los bordos de menor altura de donde los valores de diferencia relativa son más altos, no es un problema en el cálculo de los factores de seguridad, ya que también estos bordos tienen una menor carga de agua y los valores de "a" son relativamente bajos respecto a la longitud del talud.

Y en los bordos de mayor altura y con taludes más tendidos, el porcentaje de diferencia relativa en general y los promedios no exceden $\pm 5\%$, esta diferencia no es significativa en el cálculo de los factores de seguridad en los bordos cuyas coronas sean de 4 o 6 m cuando estos son calculados en las redes con las que cuenta el programa de cómputo (bordos con coronas de 5 m), se dice que no es significativo porque no se está excediendo el intervalo de significancia que se usa en la estadística para los métodos de prueba para agua, suelo y roca usados por instituciones como la *American Society for Testing and Materials* ASTM es del 95% y recordemos también que los factores de seguridad no solamente dependen del trazado de la red de flujo y de la línea de saturación, sino también de las propiedades mecánicas del material de construcción.

Cabe aclarar que instituciones como la SARH, declaran empíricamente que la línea de saturación tocaba el talud de aguas abajo a un tercio de la altura de la carga y bajo este criterio se construyeron muchos bordos que aún funcionan satisfactoriamente y como ya vimos, el punto donde llega la línea de saturación no solo depende de la carga de agua sino también del ancho de la corona, el libre bordo y de lo tendido del talud, así que este es otro punto

importante para defender que un 5% de variación no es significativo para el cálculo de los factores de seguridad en este tipo de obras.

Otro punto que puede causar un poco de variación en el trazo de la línea de saturación es la apreciación y la extrapolación del gráfico del Dr. Casagrande ya que esto varía de persona a persona, así mismo las fuerzas que intervienen en las ecuaciones de los factores de seguridad se pueden ver afectadas por esto mismo, por ejemplo al tomar las dimensiones de los cuadrados de la red, o bien, al tomar las medidas para calcular la altura promedio.

A continuación se presenta la comparación de un ejercicio hecho totalmente sin la ayuda del programa con el mismo ejemplo asistido por el programa de cómputo.

Datos del bordo del bordo propuesto

Taludes = 2:1

LB = 1 m

Carga = 7 m

Altura = 8 m

Tubos de corriente = 2

Equipotenciales = 15

Longitud del cuadro más pequeño de la red = 1m

Ángulo del arco del círculo de falla: 88,5°

Radio del arco de falla: 14,0 m

Escala =1:200

Círculo tangente al desplante

Propiedades mecánicas del material propuesto

Cohesión = 3 t/m^2

$\phi = 35^\circ$

$k = 1,64 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

$\gamma_{\text{Sat}} = 2100 \text{ kg/m}^3$

ANÁLISIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 7. Porcentajes de D.R. entre los resultados obtenidos del análisis manual y con CALESTT

PARÁMETROS	ANÁLISIS MANUAL	CON CALESTT	D.R. %
D	25,426 12	25,414 46	0,05
S (Yo)	0,946 032	0,946 396	0,04
R	8,960 994	8,954 782	0,07
Δa	2,965 176	2,963 151	0,07
A	6,00	5,99	0,17
I	0,4667	0,4667	0,0
i Crítico	1,1	1,1	0,0
i Promedio	0,329	0,329	0,0
Long. Arco Falla	21,620 55	21,621	0,0
h promedio	3,93	3,93	0,0
h_w promedio	2,92	2,92	0,0
N^1	146,168	146,180	0,0
T^1	70,532	70,530	0,0
S^1	48,501	48,507	0,012
J^2	21,479	21,479	0,0
FST	2,355	2,355	0,0
FSD ³	1,7227	1,723	0,0
V Crítica	$1,804 \times 10^{-6}$	$1,804 \times 10^{-6}$	0,0
V	$7,653 \times 10^{-7}$	$7,653 \times 10^{-7}$	0,0
Q	$1,5367 \times 10^{-6}$	$1,5367 \times 10^{-6}$	0,0

Cuevas Madrid, 2003

- 1) Corresponde a un círculo tangente al desplante en el talud de aguas arriba.
- 2) Corresponde a un círculo tangente al desplante en el talud de aguas abajo, ya no se incluye la longitud de este arco de falla, pues ya se evaluó que la diferencia es nula.
- 3) Sin tomar en cuenta las fuerzas de filtración.

Ahora vemos que la diferencia relativa entre los cálculos hechos sin el programa y los hechos con el mismo no es significativa si usamos el mismo criterio que en el análisis de diferencia relativa anterior.

Las diferencia más alta la encontramos en el cálculo de "a", que puede deberse a que con la calculadora no se toman todas la cifras y que al sumarlas

se hace como evento aparte, no siendo así en el programa de cómputo que lo hace todo integralmente tomando todas las cifras que se permiten al haber declarado las variables en ese evento como variables de doble precisión al momento de programar aunque en pantalla el formato de presentación (mantisa) sea solo de unas cuantas cifras significativas.

V CONCLUSIONES

- 5.1** El programa de cómputo CALESTT aquí expuesto ayuda a calcular la estabilidad de taludes exitosamente.
- 5.2** La principal ventaja del uso del programa realizado es el ahorro de trabajo y tiempo porque mientras en lo que se realizaron los cálculos sin el programa y el trazo de la red de flujo para un sólo círculo en aproximadamente 2 horas con la ayuda del programa el tiempo se redujo a 15 minutos, así que la relación de ahorro de tiempo en este caso particular es de 8:1, siempre y cuando el programa contenga la red con las especificaciones deseadas, porque si no es así la relación disminuye, ésta última variará dependiendo de la experiencia y habilidad de cada persona.
- 5.3** La limitación del programa de cómputo para ahorrar más tiempo es la cantidad de redes de flujo en AutoCAD, que en dado el momento se podría ampliar el número, pero compensando esa limitante, el resto del programa se diseñó lo más flexible posible para que se pudiera aplicar prácticamente a cualquier red de flujo a presa llena que se dibuje.
- 5.4** Siempre que se conozca un procedimiento para calcular un valor, existirá también la posibilidad de introducirlo a una computadora con el propósito de ahorrar tiempo y esfuerzo, además de obtener mayor precisión y eliminar cualquier posibilidad de error en los cálculos.
- 5.5** Este trabajo es un primer intento de facilitar el cálculo de la estabilidad de taludes con sección homogénea de poca elevación (bordos), por lo que queda abierta la posibilidad de hacer un programa completamente automático, es decir que incluya la fase del trazo de las redes de flujo en una sola operación.

5.6 La inclusión de las fuerzas de filtración en el cálculo del FSD en el talud de aguas abajo causa una disminución aritmética en el FSD ya que están siendo incluidas dentro de las fuerzas motoras, en otras palabras, las fuerzas de filtración se suman a las fuerzas tangenciales.

5.7 La magnitud de las fuerzas de filtración dependen de una manera importante de la red de flujo y como cada red es un caso muy particular no es posible hacer un análisis comparativo.

5.8 Finalmente dado que se modificó el Método Sueco para adaptarlo al programa CALESTT la exactitud del método ha sido afectada, por lo cual confiabilidad de todos estos resultados no será confirmada hasta que se valide el procedimiento llevando esta información a la práctica.

GLOSARIO

ALGORITMO: Es un método para resolver un problema mediante una serie de pasos precisos, definidos y finitos.

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (φ): Ángulo entre la abscisa y la tangente de la curva que representa la relación de la resistencia al corte de los esfuerzos normales que actúan dentro de un suelo.

CAÍDA DE POTENCIAL (Δh): Es la diferencia de la carga de presión entre dos líneas equipotenciales.

CÍRCULO O ARCO DE FALLA: La superficie de deslizamiento que se suponen en un análisis teórico de un suelo para el cual el factor de seguridad es el mínimo.

CÍRCULO DE MOHR: Es la representación gráfica de los esfuerzos que obran sobre varios planos en un punto dado.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (k): Gasto que pasa de agua con régimen laminar a través de la unidad de área de la sección transversal de un medio poroso bajo el efecto del gradiente unitario y a condiciones estándar de temperatura (20°C).

COHESIÓN: La porción de resistencia al corte de un suelo indicada por el término c en la fórmula de Coulomb: $s = c + \sigma \tan \varphi$.

COMPACTACIÓN: Es la densificación de un suelo por medio de manipulación mecánica.

DIAGRAMA DE FLUJO: Desde el punto de vista informático es la representación gráfica de un algoritmo.

ENVOLVENTE DE MOHR: Es la envolvente de una serie de círculos de Mohr que representan las condiciones de esfuerzo en la falla de un material dado. De acuerdo con la hipótesis de ruptura de Mohr, una envoltura es el lugar geométrico de los puntos cuyas coordenadas representan las combinaciones de los esfuerzos normales y cortantes que hacen fallar un material.

ESFUERZO (σ): Es la fuerza por unidad de área que obra dentro de una masa de suelo.

ESFUERZO CORTANTE (s): Es el esfuerzo componente tangencial a un plano dado.

FUERZAS DE FILTRACIÓN (J y j): Es la fuerza transmitida a los granos del suelo por la filtración. J es la magnitud de la fuerza en el área donde actúan y j es la fuerza por unidad de volumen.

GRADIENTE HIDRÁULICO (i): Es la pérdida de carga hidráulica por unidad de distancia de flujo.

GRADIENTE HIDRÁULICO CRÍTICO (i_{crit}): Es el gradiente hidráulico al cual la presión intergranular en la masa de un suelo sin cohesión se reduce a cero por la corriente de agua hacia arriba.

LÍNEA DE FLUJO: Es la trayectoria que sigue una partícula de agua a lo largo de su curso cuando se filtra en las condiciones de flujo laminar.

LÍNEA EQUIPOTENCIAL: Es la línea a la que el agua subiría a la misma elevación en tubos piezométricos.

PRUEBA TRIAXIAL: Es una prueba en la que una muestra cilíndrica de suelo confinada cubierta por una membrana impermeable, se sujeta a una presión y luego se carga axialmente hasta que falle.

RED DE FLUJO: Es la representación gráfica de las líneas de flujo y las equipotenciales usada en los estudios de los fenómenos de la filtración.

SUBPRESIÓN: Es la presión del agua que obra hacia arriba sobre una estructura.

TUBIFICACIÓN: El movimiento de las partículas del suelo provocado por las filtraciones que provocan la formación de conductos.

VELOCIDAD CRÍTICA: Es la velocidad del agua que es capaz de arrastrar las partículas finas del suelo.

Bibliografía citada

- 1.-American Society for Testing and Materials.2001. Annual Book of ASTM Standards. U.S.A. Volume 11.01,11.02.
- 2.-American Society for Testing and Materials.1994. Annual Book of ASTM Standards. U.S.A. Volume 04.08,04.09.
- 3.- Arreguín Cortés Felipe. 2000 Obras de Excedencia. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. p 1-10
- 4.- Arteaga Tovar Eduardo. 1985. Normas y Criterios Generales que rigen el Proyecto de un Bordo de Almacenamiento. 2ª. Edición. UACH, México. p. 5-8, 59-70.
- 5.- Badillo Juárez Eulalio y Rico Rodríguez Alfonso. 2001. Mecánica de Suelos. 2ª. Edición. 3 Tomos. Editorial Limusa. México.
- 6.- Cevallos Javier. 1997. Enciclopedia de Visual Basic 4. Editorial Alfaomega. México. p. 3-538
- 7.- Del Castillo Rabadán Salvador Clemente. 2001. Apuntes de Clase del Curso de Mecánica de Suelos. Inédito.
- 8.- Flamand, Carlos. 1995. Introducción a la Mecánica de Suelos. 2ª. Edición. UACH. México. 150-155
- 9.- Guerrero Torres Jehová. 1948. Apuntes de Presas de Tierra. Inédito.
- 10.- Marsal J. Raúl, Reséndiz N. Daniel. 1975. Presas de Tierra y Enrocamiento Limusa. México. p. 105-121.

11.-Noyola G. Pablo y Zatarín T. Alfredo. 1998. Proyecto y Construcción de Abrevaderos. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. UACH. México. p. B-11 – B-13.

12.-Pérez Nieto S, Sánchez Bravo J.R y Hernández Saucedo F.R. 1998. Experiencias en el Proyecto y Construcción de Pequeños Bordos de Almacenamiento de Agua. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. UACH. México. p. B-16 – B-19.

13.- SARH. 1976. Diseño de Presas Pequeñas. 2ª. Edición. CECSA. México. p. 191-228.

14.- Villaseñor Contreras Jesús. 1978. Proyectos de Obras Hidráulicas. UACH. México. p. 9-10, 15-17, 42-43, 39-48.

PAGINAS Web

www.semarnat.gob.mx/cna

Bibliografía consultada

- 1.- Cevallos Javier. 1997. Enciclopedia de Visual Basic 4. Editorial Alfaomega. México. p. 3-538
- 2.- Cevallos Javier. 2000. Visual C ++ 6. Alfaomega. 2ª. Edición. México. p. 3-4.
- 3.- García Díaz Rafael. 2002. Manual de Fórmulas de Ingeniería. 2ª. Edición. Editorial Limusa. México. p. 1-1 - 2 - 14, 3 - 1 - 3 – 9
- 4.- Joyanes Aguilar Luis. 1996. Programación Orientada a Objetos. Mc Graw Hill. España. p, 3-5.
- 5.- Joyanes Aguilar Luis. 1995. Programación en Turbo Pascal. Mc Graw Hill. México. p. 17-18.
- 6.- Kernighan Brian, Ritchie Dennis. 1991. El Lenguaje de Programación C. 2ª. Edición. Prentice Hall. 2ª. Edición. México. p. 5-15
- 7.-Marks Lionel, Baumeister Theodore.1986. Manual del Ingeniero Mecánico. 8ª. Edición. Mc Graw Hill. México. p 5-75 - 5-84.
- 8.-Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 1993. Norma Oficial Mexicana: NOM-008-SCFI-1993 Sistema General de Unidades de Medida. Publicación de vigencia en el Diario Federal de la Federación el 14 de Octubre de 1993.
- 9.- Sowers F. George y Sower B. George. 1994. Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones. 6ª. Edición. Limusa Wiley. p. 642-643.
- 10.- Terzaghi, Karl. 1943. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley and Sons. USA. p. 191-228.
- 11.- Whitlow Roy. 1994. Fundamentos de Mecánica de Suelos. CECSA. México. p 369 – 418.

12.- Zaratian Beck. 1999. Microsoft Visual C++ 6.0 Manual del Programador.
Mc Graw Hill. España. p. 3-4, 200-255.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Anexo

Código fuente de CALESTT

```
Private Sub Command1_Click()
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
Dim altura_bordo As Double
Dim LB As Double
Dim S As Double
Dim R As Double
Dim alturaagua As Double
'd
Text4.Text = (Text1.Text * (1 / ((Sin((Text9.Text * 0.01745)))))) + Text3.Text + (Text2.Text * (1 /
(Sin((Text9.Text * 0.01745)))))) + 0.3
alturaagua = (Text1.Text - Text2.Text)
Text4.Text = Format(Text4, "#,##0.0000000")
's o Yo =
Text5.Text = Sqr((Text4.Text * Text4.Text) + (alturaagua * alturaagua)) - Text4.Text
CS = Cos((Text9.Text * 0.01745))
Text5.Text = Format(Text5, "#,##0.0000000")
'R=
Text7.Text = (Text5.Text) / (1 - CS)
Text7.Text = Format(Text7, "#,##0.0000000")
'delta a =
Text6.Text = (Text7.Text * Text10.Text)
Text6.Text = Format(Text6, "#,##0.0000000")
'a=
Text8.Text = (Text7.Text - Text6.Text)
Text8.Text = Format(Text8, "#,##0.000")
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
```

MsgBox "Las redes de flujo de AutoCAD en total son 30, y la manera de abrir la red correcta es la siguiente: los archivos tienen el siguiente formato de identificación 15-10, 22-8, 18-6, etc., donde el primer número es el valor del aproximado del talud en grados y el segundo número es la altura del bordo, por ejemplo el dibujo 15-10 corresponde a un bordo con taludes de 3.5:1 y con una altura total de 10 metros. El valor en grados para el talud 1:1 es 45, el del talud 2:1 es 26, el del talud 2.5:1 es 22, el del talud 3:1 es 18 y el del talud 3.5:1 es 15. Las alturas de los bordos van de los 5 a los 10 metros en números enteros, la corona del bordo es de 5 metros en todos los dibujos, así como el libre bordo es de 1 metro. Para mayor detalle de esta información vea la Tabla 5 del texto", vbInformation, "Información de las redes contenidas en los archivos de AutoCAD"

```
End Sub
```

```
Private Sub fs_Click()
factores.Show
```

**TÓPIS CON
FALLA DE ORIGEN**

End Sub

```
Public Sub op1_Click()  
Dim angulo_talud As Double  
Dim casa1 As Double  
angulo_talud = 45  
casa1 = 0,3193  
Text9.Text = angulo_talud  
Text10.Text = casa1  
End Sub
```

```
Public Sub op2_Click()  
Dim angulo_talud As Double  
Dim casa1 As Double  
angulo_talud = 26.56505118  
casa1 = 0,3309  
Text9.Text = angulo_talud  
Text10.Text = casa1  
End Sub
```

```
Public Sub op3_Click()  
Dim angulo_talud As Double  
Dim casa1 As Double  
angulo_talud = 21.80515759  
casa1 = 0,3338  
Text9.Text = angulo_talud  
Text10.Text = casa1  
End Sub
```

```
Public Sub op4_Click()  
Dim angulo_talud As Double  
Dim casa1 As Double  
angulo_talud = 18.43553009  
casa1 = 0,3359  
Text9.Text = angulo_talud  
Text10.Text = casa1  
End Sub
```

```
Public Sub op5_Click()  
Dim angulo_talud As Double  
Dim casa1 As Double  
angulo_talud = 15.94269341  
casa1 = 0,3375  
Text9.Text = angulo_talud  
Text10.Text = casa1  
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()  
On Local Error GoTo LineError  
If Err = 100 Then  
LineError:
```

```
MsgBox Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
'talud 1:1
```

```
If Text1 = 5 And OP1.Value = True And Text2 = 1 And Text3 >= 4 And Text3 <= 6 Then
```

```
Picture1.Picture = LoadPicture("A:\45-5.wmf")
```

```
Elseif Text1 = 6 And OP1.Value = True And Text2 = 1 And Text3 >= 4 And Text3 <= 6 Then
```

```
Picture1.Picture = LoadPicture("A:\45-6.wmf")
```

```
Elseif Text1 = 7 And OP1.Value = True And Text2 = 1 And Text3 >= 4 And Text3 <= 6 Then
```

```
Picture1.Picture = LoadPicture("A:\45-7.wmf")
```

```
Elseif Text1 = 8 And OP1.Value = True And Text2 = 1 And Text3 >= 4 And Text3 <= 6 Then
```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN


```

Msgsis = MsgBox("No existe red de flujo con esas dimensiones, por lo que usted deberá
dibujarla", vbOKOnly + vbCritical, "Redes de Flujo")
Exit Sub
End If
End Sub

Private Sub salida_Click()
Unload Me
End Sub

'gradiente maximo
Private Sub Command1_Click()
Dim imaxtext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
imax.Text = (deltah.Text) / (Val(longc.Text))
imax.Text = Format(imax, "##,##0.000")
End Sub
'Normales
Private Sub Command10_Click()
Dim ntext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
N.Text = (Val(gamasat.Text) * hpro.Text * Cos(Val(angfricc.Text * 0.01745)) * longarc.Text) /
1000
N.Text = Format(N, "##,##0.000")
End Sub
'Tangenciales
Private Sub Command11_Click()
Dim ttext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
T.Text = (Val(gamasat.Text) * hpro.Text * Sin(Val(angfricc.Text * 0.01745)) * longarc.Text) /
1000
T.Text = Format(T, "##,##0.000")
End Sub

'subpresión
Private Sub Command12_Click()
Dim stext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If

```

```

S.Text = (1000 * (hpro.Text) * (longiarcsat.Text)) / 1000
S.Text = Format(S, "#,##0.000")
End Sub

```

```

'fuerzas de filtración
Private Sub Command13_Click()
Dim jtext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
J.Text = ((iprom.Text) * 1000 * (hpro.Text) * (longiarcsat.Text)) / 1000
J.Text = Format(J, "#,##0.000")
End Sub

```

```

'factor de seguridad contra la tubificación
Private Sub Command14_Click()
Dim fsttext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
fst.Text = (icrit.Text) / (imax.Text)
fst.Text = Format(fst, "#,##0.000")
End Sub

```

```

'factor de seguridad contra el deslizamiento
Private Sub Command15_Click()
Dim fsdtext As Double
Dim cohesiontext As Double
Dim angletext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
fsd.Text = ((Val(N.Text) - Val(S.Text)) * ((Sin(angfricc.Text * 0.01745))) / (Cos(angfricc.Text * 0.01745))) + (Val(cohesion.Text) * Val(longarc.Text)) / (Val(T.Text) + Val(J.Text))
fsd.Text = Format(fsd, "#,##0.000")
End Sub

```

```

'delta h
Private Sub Command16_Click()
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
Dim deltatext As Double
deltah.Text = (Val(agua.Text)) / (Val(equi.Text))
deltah.Text = Format(deltah, "#,##0.000")
End Sub

```

```

'limpiar cajas de texto del gradiente promedio
Private Sub Command17_Click()
'On Local Error GoTo LineError
'If Err = 100 Then
'LineError:
'Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
'End If
Dim ipromtext As Double
a12.Text = ""
a13.Text = ""
a14.Text = ""
a15.Text = ""
iprom.Text = ""
End Sub

'longitud del arco de falla saturado
Private Sub Command18_Click()
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
Dim arcsattext As Double
Dim longiarcsattext As Double
longiarcsat.Text = Val(radio.Text) * (Val(arcsat.Text) * 0.01745)
longiarcsat.Text = Format(longiarcsat, "#,##0.000")
End Sub
'gradiente critico
Private Sub Command2_Click()
Dim icrittext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
icrit.Text = ((Val(gamasat.Text)) - 1000) / 1000
icrit.Text = Format(icrit, "#,##0.0")
End Sub
'longitud del arco de falla
Private Sub Command3_Click()
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
Dim radiotext As Double
Dim angletext As Double
Dim longarcctext As Double
longarc.Text = Val(radio.Text) * (Val(angle.Text) * 0.01745)
longarc.Text = Format(longarc, "#,##0.000")
End Sub
'altura promedio de las dovelas
Public Sub Command4_Click()
Dim hprottext As Double

```

```

On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
hpro.Text = (Val(a1) + Val(a2) + Val(a3) + Val(a4) + Val(a5) + Val(a6) + Val(a7) + Val(a8) +
Val(a9) + Val(a10)) / 10
hpro.Text = Format(hpro, "#,##0.00")
End Sub

'gradiente promedio
Private Sub Command5_Click()
Dim ipromtext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
iprom.Text = (((deltah.Text) / Val(a12.Text)) + ((deltah.Text) / Val(a13.Text)) + ((deltah.Text) /
Val(a14.Text)) + ((deltah.Text) / Val(a15.Text))) / 4
iprom.Text = Format(iprom, "#,##0.000")
End Sub
'velocidad
Private Sub Command6_Click()
Dim veltext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
vel.Text = (Val(k.Text) * Val(imax))

End Sub
'velocidad critica
Private Sub Command7_Click()
Dim velcrittext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
velcrit.Text = Val(k.Text) * Val(icrit.Text)

End Sub
'gasto de la red de flujo
Private Sub Command8_Click()
Dim qtext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
Msgsis = MsgBox(Err.Number & "," & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
q.Text = (Val(tcarr.Text) / Val(equi.Text)) * Val(k.Text) * Val(agua.Text)

```

```

End Sub
'boton limpiar
Private Sub Command9_Click()
Dim hprotext As Double
On Local Error GoTo LineError
If Err = 100 Then
LineError:
MsgBox(Err.Number & ", " & Err.Description, vbOKOnly + vbCritical, "Error")
Exit Sub
End If
a1.Text = ""
a2.Text = ""
a3.Text = ""
a4.Text = ""
a5.Text = ""
a6.Text = ""
a7.Text = ""
a8.Text = ""
a9.Text = ""
a10.Text = ""
hpro.Text = ""
End Sub

Private Sub salprog_Click()
Unload Me
End Sub

Option Explicit

Private Sub Form_KeyPress(KeyAscii As Integer)
Unload Me
End Sub

Private Sub Form_Load()
lblVersion.Caption = "Versión " & App.Major & "." & App.Minor & "." & App.Revision
End Sub

Private Sub Frame1_Click()
Unload Me
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
Form1.Show
Unload Me
End Sub

```

