

UNIVERSIDAD DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA



LINEA DE SATURACION EN EMPRESAS DE TIERRA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGRONOMO
PRESENTA EL PASANTE
LUIS LEON LANDOIS PALENCIA.

MONTERREY, N. L.

NOVIEMBRE DE 1967

543
040.627
FAI
1967.

T

TC543

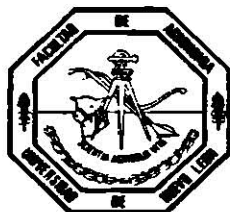
L3

c.1



1080062073

UNIVERSIDAD DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA



LINEA DE SATURACION EN EMPRESAS DE TIERRA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGRONOMO
PRESENTA EL PASANTE
LUIS LEON LANDOIS PALENCIA.

MONTERREY, N. L.

NOVIEMBRE DE 1967

T
FC 543
L3

040.627
FAI
1967



Fitesis



Hago patente mi agradecimiento a todas aquellas personas que, en alguna forma colaboraron e hicieron posible la elaboración de esta tesis.

En particular

Ing. César Tijerina.

Ing. Rodolfo Rodríguez.

Ing. Gildardo Carmona.

Fac. de Ingeniería Civil de la U.N.L.
al permitirme usar su laboratorio e instrumental.

A MIS PADRES.

A MIS HERMANOS

A MIS TIAS

A MIS PRIMAS

MIS MAESTROS

A MIS COMPAÑEROS

A MIS AMIGOS

INDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION DE LITERATURA	3
1. Mecánica del Suelo	3
2. Densidad Relativa	3
3. Granulometria	6
4. Naturaleza Física de los Separados del Suelo	6
5. Características Mineralógicas.....	7
6. Clases Texturales	8
7. Análisis Granulométrico del Suelo	9
8. Límites de Atterberg	9
a) Límite Líquido	11
b) Límite Plástico	11
c) Límite Contracción	11
d) Índice de Plasticidad	12
9. Permeabilidad de los Suelos	12
10. Resistencia del Suelo al Esfuerzo Cortante	13
11. Peso Volumétrico Seco Máximo Proctor	15
12. Línea de Saturación en Presas de Tierra	17
13. Demostración Analítica de los Diferentes Puntos en que se basa la Ecuación de A Casa Grande	21
III. MATERIALES Y METODOS	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	27
V. CONCLUSIONES	42
VI. RECOMENDACIONES	43
VII BIBLIOGRAFIA	44

INDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA I. CLASIFICACION DE LAS PARTICULAS DE SUELO SEGUN LOS SISTEMAS USADOS POR EL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS Y POR LA SOCIEDAD INTERNACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO	7
TABLA II. ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS SUELOS ESTUDIADOS	23
TABLA III. ANALISIS MECANICO DE LOS SUELOS ESTUDIADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO DE MECANICA DEL SUELO EN LA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA U.N.L.	24
TABLA IV. VALORES CONSTANTES DE X Y VALORES VARIABLES DE Y CORRESPONDIENTES A LAS 5 REPETICIONES PARA LOS SUELOS A, B, C, D y E	29
TABLA V. VALORES OBTENIDOS PARA EL TRAZO DE LA CURVA DE REGRESION DE LOS SUELOS A, B, C, D y E ..	30

INDICE DE FIGURAS

		Pág.
FIGURA 1.	APARATOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD RELATIVA DE UN SUELO	4
FIGURA 2.	RELACION ENTRE MATERIA SOLIDA Y VACIOS EN UNA MASA DE SUELO	5
FIGURA 3.	TRIANGULO DE TEXTURAS	10
FIGURA 4.	EQUIPO UTILIZADO PARA LA DETERMINACION DE LOS LIMITES ATTERBERG. LIMITE LIQUIDO.....	11
FIGURA 5.	EQUIPO UTILIZADO PARA DETERMINAR LOS LIMITES DE ATTERBERG. CONTRACCION LINEAL.....	12
FIGURA 6.	DIAGRAMA DE MOHR	14
FIGURA 7.	EQUIPO UTILIZADO PARA OBTENER EL PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO PROCTOR	16
FIGURA 8.	GRAFICA DE LA CURVA TEORICA PESO VOLUMETRICO SECO-HUMEDO	18
FIGURA 9.	PARABOLA EN COORDENADAS POLARES P y θ (CON ORIGEN EN EL FOCO A)	18
FIGURA 10.	LINEA DE SATURACION EN PRESAS DE TIERRA (LAS DISTANCIAS $B_0 B_0'$ y $C_0 C_0'$ SON SIMPLEMENTE DISEÑADAS)	20
FIGURA 11	GRAFICA DE LOS VALORES $\frac{1 - C}{1 - \cos \theta}$ USADOS EN LA CONSTRUCCION DE LA LINEA DE SATURACION EN PRESAS DE TIERRA	21
FIGURA 12.	PARABOLA CON FOCO ($y_0/2, \theta$) Y VERTICE (0, 0)	22
FIGURA 13.	GRAFICA DE LA SECUENCIA DE LAS LINEAS DE SATURACION (LINEAS SUPERIORES) Y DE OTRAS LINEAS DE FLUJO (LINEAS INFERIORES) CORRESPONDIENTES AL SUELO A	32

FIGURA 14.	GRAFICA DE LA SECUENCIA DE LAS LINEAS DE SATURACION (LINEAS SUPERIORES) Y DE OTRAS LINEAS DE FLUJO (LINEAS INFERIORES) CORRESPONDIENTE AL SUELO B	33
FIGURA 15.	GRAFICA DE LA SECUENCIA DE LAS LINEAS DE SATURACION (LINEAS SUPERIORES) Y DE OTRAS LINEAS DE FLUJO (LINEAS INFERIORES) CORRESPONDIENTES AL SUELO C	34
FIGURA 16.	GRAFICA DE LA SECUENCIA DE LAS LINEAS DE SATURACION (LINEAS SUPERIORES) Y DE OTRAS LINEAS DE FLUJO (LINEAS INFERIORES) CORRESPONDIENTES AL SUELO D	35
FIGURA 17.	GRAFICA DE LA SECUENCIA DE LAS LINEAS DE SATURACION (LINEAS SUPERIORES) Y DE OTRAS LINEAS DE FLUJO (LINEAS INFERIORES) CORRESPONDIENTES AL SUELO E	36
FIGURA 18.	CURVAS PRODUCIDAS POR EL COLORANTE (FLORESCEINA) SOBRE UN MODELO DE PRESA	27
FIGURA 19.	CURVA PRODUCIDA POR EL COLORANTE (FLORESCEINA) SOBRE UN MODELO DE PRESA.....	28
FIGURA 20.	COMPARACION GRAFICA DE LA LINEA DE SATURACION Y LA LINEA OBTENIDA SUELO A	37
FIGURA 21.	COMPARACION GRAFICA DE LA LINEA DE SATURACION Y LA LINEA OBTENIDA SUELO B	38
FIGURA 22.	COMPARACION GRAFICA DE LA LINEA DE SATURACION Y LA LINEA OBTENIDA SUELO C	39
FIGURA 23.	COMPARACION GRAFICA DE LA LINEA DE SATURACION Y LA LINEA OBTENIDA SUELO D	40
FIGURA 24.	COMPARACION GRAFICA DE LA LINEA DE SATURACION Y LA LINEA OBTENIDA SUELO E	41

INTRODUCCION

El agua, factor importante en el desarrollo de todo ser viviente, es fácilmente perdido por diferentes formas, siendo la causa principal el escurrimiento.

México, en general, tiene lugares de escasa precipitación pluvial, por lo cual es muy importante conservar el agua que se escurre en tales regiones, mediante la construcción de vasos de almacenamiento. Cuando en los parajes seleccionados para construir una cortina de concreto los costos son muy altos, es preferible construir presas de tierra.

Una presa de tierra es un dique o terraplén construido, en un valle, para formar un depósito de agua. Debe ser lo bastante impermeable a fin de evitar la pérdida excesiva de agua del embalse. El proyecto también debe asegurar frentes de la presa estables. El asentamiento de la cresta de la presa, una vez construida no deberá ser tan grande como para reducir el desnivel cresta-agua.

La construcción de presas de tierra supone la selección de un tipo de suelo adecuado; también se deberá considerar su extracción y la consiguiente alteración de su estado natural, así como la colocación de este material en la nueva estructura, de una manera controlada y definida.

Se puede conocer la naturaleza, la composición y otras propiedades del suelo por utilizar, así como un campo probable de variación; por ello, es posible, reproducir en el laboratorio, con gran analogía, las condiciones aproximadas que prevalecerán en la estructura y ensayar en estas condiciones los tipos de suelo que se podrían usar en su ejecución. Es decir, que cabe abordar el estudio de las obras de tierra en una forma no muy diferente a como se estudian otras estructuras, en las que se emplean materiales elaborados por el hombre.

Un factor que debe tomarse en cuenta en la estabilidad de las presas de tierra, son las redes de filtración a través de la presa, pues ello determina la magnitud de las presiones hidrostáticas que actúan sobre la superficie de deslizamiento.

Estas redes de filtración están formadas por dos series de líneas normales. Las primeras se denominan líneas de flujo y representan la trayectoria que sigue

agua a través del talud. La segunda serie de líneas llamadas equipotenciales, une los puntos que tienen el mismo potencial hidrostático.

En este trabajo se determinó la secuencia que sigue el agua a través de la presa de tierra, en modelos construidos en el laboratorio, tratando de encontrar o establecer la línea de saturación en suelos correspondientes a diferentes clases textuales, lo cual se hizo reproduciendo algunas de las características que prevalecerían en las presas de tierra.

REVISION DE LITERATURA

Mecánica del Suelo.

El término suelo o tierra, como se emplea en Agronomía, se define como la capa superficial con horizontes diferenciados y en relación con la vida de las plantas. Muy diferente al término suelo o tierra que se emplea en Ingeniería, definiéndolo como el material en que se apoyan las fundaciones o que se emplea para construir estructuras de tierra; puede en algunos casos ser simplemente un material heterogéneo de relleno.

El suelo es en general una acumulación heterogénea de granos minerales (se encuentra también materia orgánica), algunos cementados entre sí de modo que resulte una masa rígida. Los vacíos que quedan entre esos granos, o sean los poros, están completa o parcialmente llenos de agua y aire.

Considerando las propiedades del suelo, hay una transición importante entre la fase sólida y la líquida. Esta zona de transición sería la capa de agua adsorbida por las partículas de suelo y que tiene propiedades que difieren de las del agua libre.

Densidad Relativa

La densidad relativa de un suelo es la relación de la densidad absoluta promedio de las partículas que constituyen el suelo, a la densidad absoluta del agua destilada a 4°C, que tiene un valor de un gramo por Cm. cúbico (1)

Expresada en forma de ecuación:

$$D_r = \frac{D_s}{D_w}$$

D_r = Densidad relativa

D_s = Densidad absoluta del sólido

D_w = Densidad absoluta del agua destilada a temperatura de 4° C.

La figura (1) muestra el equipo utilizado en la determinación de esta prueba. Posteriormente, utilizando la siguiente fórmula, se obtuvo su valor:

$$D_r = \frac{P_s}{P_s + P_{ma} - P_{mas}}$$

Donde:

P_s = Peso seco del material (suelo)

P_{ma} = Peso del matraz con agua

P_{mas} = Peso del matraz con agua y suelo

En el laboratorio se puede obtener la densidad relativa o aparente de suelo húmedo, seco y en base al valor del peso específico de las partículas sólidas.

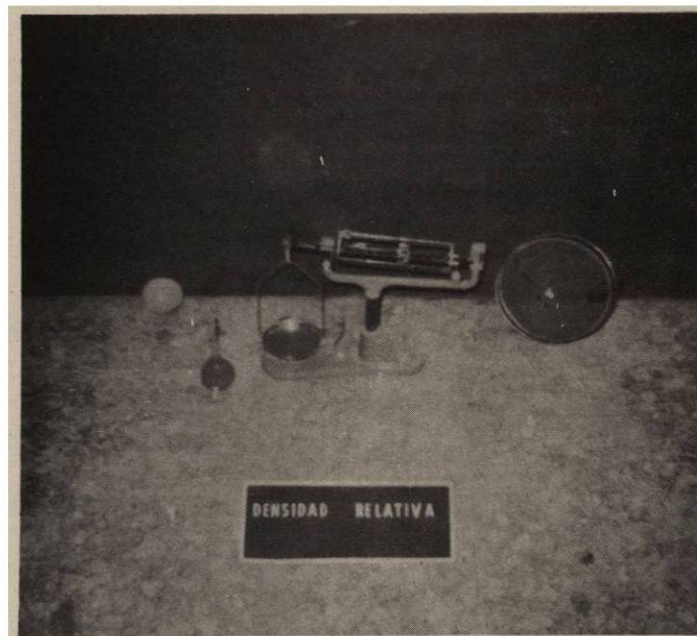


Fig. 1 Aparatos utilizados para determinar la densidad relativa de un suelo.
1 Cápsula, 2 Matraz con agua y suelo, 3 Balanza, 4 Malla # 40

Se pueden deducir mejor las relaciones agua, aire, sólidos, con ayuda del es quema de la Fig. 2 en que se encuentran separadas las 3 fases. (5)

En dicha figura se utilizaron los siguientes símbolos:

V = Volúmen total de una masa de suelo = P

V_s = Volúmen de la materia sólida de una masa de suelo

V_v = Volúmen de los vacíos o poros de una masa de suelo

V_a = Volúmen del agua contenida en una masa de suelo = P_a

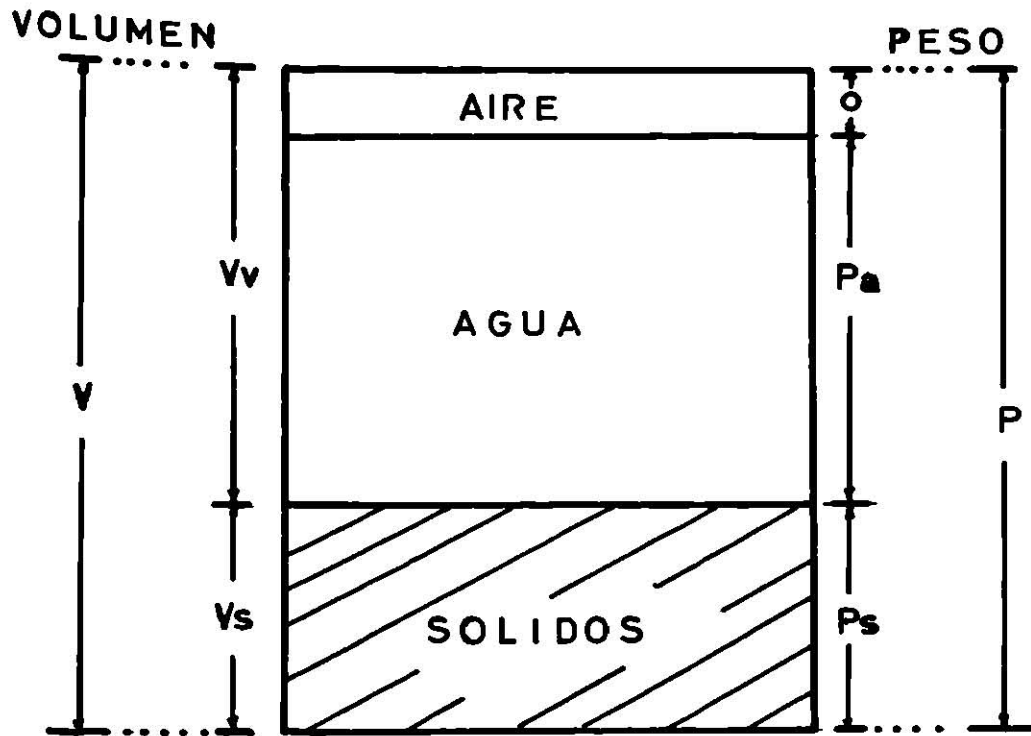


Fig. 2 Relación entre materia sólida y vacíos en una masa de suelo.

P = Peso total de una masa de suelo

P_s = Peso de la materia sólida de una masa de suelo

D = Densidad de una masa de suelo $\frac{P}{V}$

Y_2 = Peso específico del suelo $\frac{P_s}{V_s}$

e = Relación de vacíos = $\frac{V_v}{V_s}$

n = Porosidad $\frac{V_v}{V}$ también se expresa en % = $\frac{V_v}{V} \times 100$

w = Contenido de agua de una masa de suelo = $\frac{P_a}{P_s}$

$w\%$ = Contenido de agua en % = $\frac{P_a}{P_s} \times 100$

G = Grado de saturación de una masa de suelo $\frac{V_v}{V_a}$

La porosidad y la relación de vacíos son de fundamental importancia y constituyen la base del cálculo en todos los ensayos sobre suelo.

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

La porosidad se utiliza principalmente en estudios relacionados con la agricultura y la relación de vacíos es usada en estudios sobre la consolidación del suelo.

Granulometría

Desde que se empezó a estudiar el suelo, desde el punto de vista de la Agricultura, se pensó que sus propiedades debían guardar alguna relación con la composición granulométrica o textura del suelo. Llámándose así a la repartición del material en fracciones entre ciertos límites de tamaño de las partículas, de modo que los primeros trabajos se orientaron en ése sentido y lo mismo ha sucedido en la mecánica del suelo.

La textura del suelo está relacionada con el tamaño de las partículas minerales. Específicamente se refiere a la proporción relativa de los varios grupos dimensionales de partículas de un suelo dado.

Para estudiar sucesivamente las partículas minerales de un suelo, los científicos las clasifican, por lo regular, en grupos convenientes, según su tamaño (Tabla I). Estos diferentes grupos se llaman fracciones o separados. El procedimiento analítico por el cual las partículas son así separadas se llama análisis mecánico o granulométrico. Es realmente una determinación de la distribución de los tamaños de las partículas (2).

Naturaleza Física de los Separados del Suelo

Los granos de arena pueden ser redondeados o completamente irregulares, dependiendo de la erosión que hayan recibido. Cuando no están cubiertas de arcilla y limo, estas partículas carecen prácticamente de plasticidad y de tenacidad y por consiguiente están poco influenciadas por los cambios del contenido de la mezcla. Su capacidad de absorción es escasa y debido a los grandes espacios entre sus partículas separadas, el paso del agua filtrante es rápido.

TABLA 1. CLASIFICACION DE LAS PARTICULAS DE SUELO SEGUN LOS SISTEMAS USADOS POR EL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS E.U. Y POR LA SOCIEDAD INTERNACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO.

	Sistema de los E. U.	Sistema Internacional
Fracción del Suelo	Diámetros Límite en m.m.	Diámetros límite en m.m.
Arena muy gruesa	2.00 - 1.00	
Arena gruesa	1.00 - 0.50	2.00 - 0.20
Arena media	0.50 - 0.25	
Arena fina	0.25 - 0.10	0.20 - 0.02
Arena muy fina	0.10 - 0.05	
Limo	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002
Arcillas	menos de 0.002	menos de 0.002

Las partículas de arcilla corrientemente están dispuestas en placas o escamas, como la mica, y si se humedecen son muy plásticas. Cuando se moja la arcilla con una cantidad adecuada de agua, se dilata y se vuelve pegajosa. Al secarse se encoje, con absorción de considerable energía. La capacidad de absorción de las arcillas para el agua, gases y sales solubles, es muy alta.

El limo está compuesto de fragmentos irregulares, distintos en forma y raras veces lisos o pulidos. La fracción de limo posee alguna plasticidad, cohesión y absorción, debido a que por lo general está cubierto de arcilla; pero desde luego, en mucho menor grado que la propia fracción de arcilla. De hecho, el limo es un constituyente no conveniente para el suelo, a menos que esté complementado con cantidades adecuadas de arena, arcilla y materia orgánica (2).

Características Mineralógicas

Las partículas de arena más grande son casi siempre fragmentos de roca, sobre todo de cuarzo, que es el más común de los minerales de esta fracción. Además,

existen cantidades variables de otros minerales primarios corrientes, tales como los diferentes feldespatos y micas.

La gibbsita, hematites y limonita, son minerales que también se hayan frecuentemente revistiendo los granos de arena. Los dos últimos dan al suelo varias tonalidades de rojo y amarillo, si están presentes en cantidades suficientes.

El cuarzo domina en las arenas y fracciones grandes de limo. Los silicatos primarios, como los feldespatos horblenda y micas, están presentes en las arenas, pero tienden a desaparecer en la fracción limosa. Otros minerales secundarios, como los óxidos de hierro y aluminio, son predominantes en el limo fino.

Algunas de las partículas de arcilla, especialmente las fracciones más grandes, se componen de los minerales ya citados, como cuarzo, hematites y gibbsita. Otro grupo más importante, sin embargo, lo forman el complejo de silicatos aluminicos. Se reconocen tres tipos de minerales importantes, aunque otros son conocidos en cantidades significativas: caolinita, ilita y montmorillonita. Estos grupos varían grandemente en plasticidad, cohesión y absorción, siendo la caolinita el más bajo en estas propiedades y la montmorillonita el más alto. (2)

Clases Texturales

Se consideran tres grupos fundamentales y generales de suelos: suelos arenosos, suelos francos y suelos arcillosos. Estos grupos se han dividido a su vez en otras clases texturales.

Arena. - El grupo de las arenas incluye todos los suelos de los cuales los separados de arena dan un 70% o más de todo el material en peso. Las propiedades de tales suelos son, desde luego, característicamente arenosas.

Arcillas. - Para que un suelo sea designado como una arcilla debe llevar como mínimo un 35% de fracción arcillosa y en la mayor parte de los casos no menos del 40%. A medida que el porcentaje de arcilla excede el 40%, las características de este separado es dominante distintamente y la clase se llama arcilla arenosa, arcilla limosa o lo que es más corriente, simplemente arcilla. Conviene observar que las arcillas arenosas contienen casi siempre más arena que las arcillas limosas.

Suelos francos.- El grupo de los suelos francos o de consistencia media, que contiene muchas subdivisiones, es más fácil de estudiar. Un suelo franco ideal puede ser definido como una mezcla de arena, limo y arcilla, que exhiben propiedades ligeras y pesadas casi en iguales proporciones.

Por lo común, los suelos francos poseen las propiedades deseables tanto de las arenas como de las arcillas, sin las indeseables, como la extremada falta de cohesión y baja capacidad de retención de las arenas y la compacidad y lento movimiento del aire y del agua de las arcillas. (2)

Análisis Granulométrico de Suelo

El análisis granulométrico de los suelos se determinó por el método de Bouyoucos o del hidrómetro.

Bouyoucos propuso el empleo del hidrómetro para verificar el análisis mecánico, basándose en la circunstancia de que la densidad de una suspensión acuosa de partículas finas varía directamente con la cantidad de partículas en suspensión y que, al dejar en reposo dicha cantidad, disminuye a medida que se van asentando las partículas según su diametro y el tiempo transcurrido, tal como lo establece la ley de Stokes. (4)

Una vez determinados los porcentajes de arena, limo y arcilla, se obtuvieron las clases texturales utilizando el triángulo de texturas que se muestra en la Figura 3.

Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg determinan la plasticidad de los suelos, entendiéndose por plasticidad a la propiedad de un material que le permite sufrir una deformación rápida sin que se note elasticidad, ni que muestre comienzo de rotura.

Atterberg demostró en forma concluyente, que la plasticidad no puede expresarse en una sola constante o dato, y dió los métodos para determinar los límites que, combinados, dan la plasticidad.

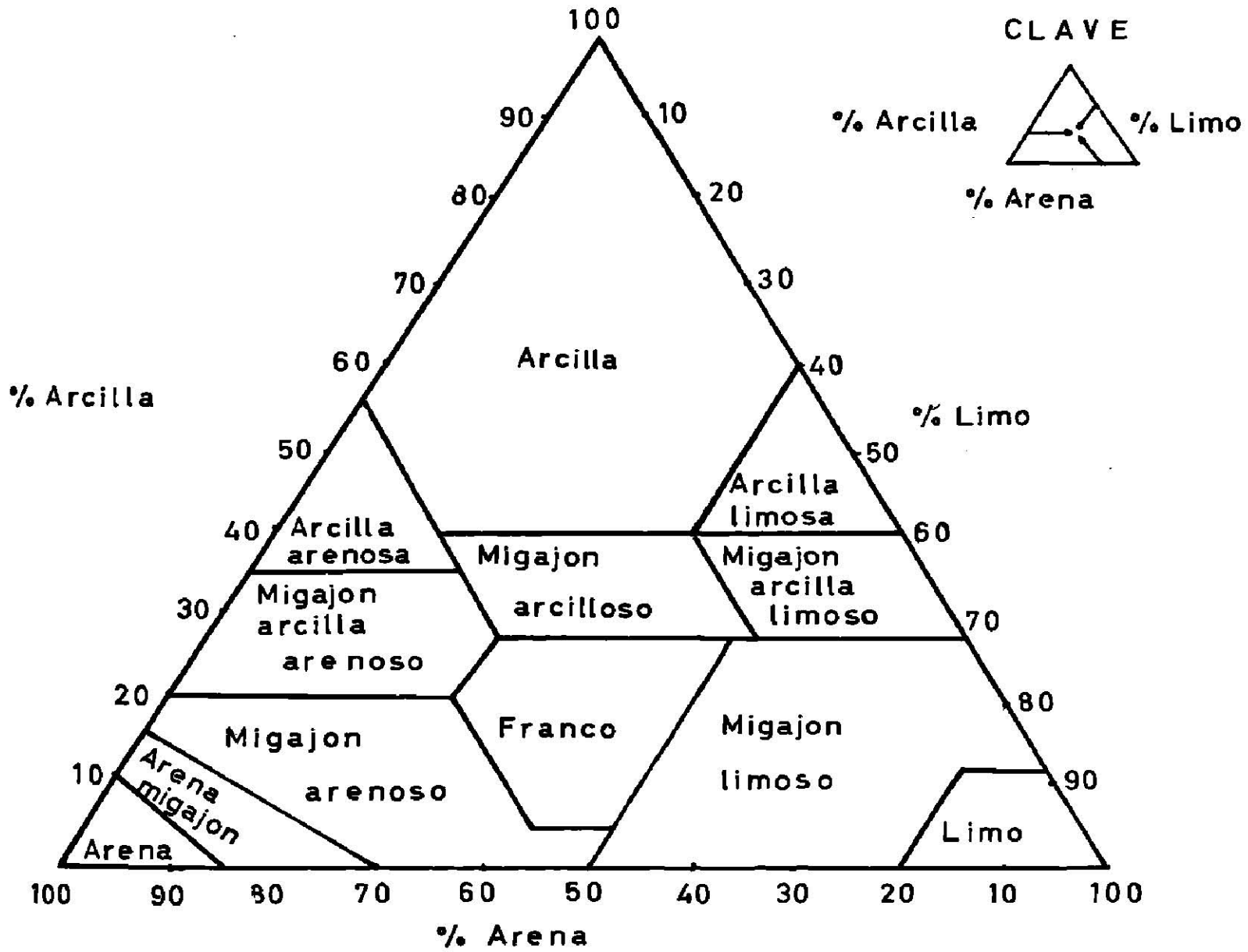


Figura 3.- Triángulo de texturas.

Límite líquido.- Se define como el contenido de agua que debe tener un suelo moldeado, para que una muestra del mismo que se coloca en una copa de latón (aparato de Casa Grande, Fig. 4) que al practicarle una ranura de dimensiones estandar y al golpear la cápsula, cierre sin resbalar en su apoyo. Este límite da una medida de la resistencia al corte que posee un suelo mezclado con agua. (6) En la figura 4 se muestra el equipo usado para dicha determinación.

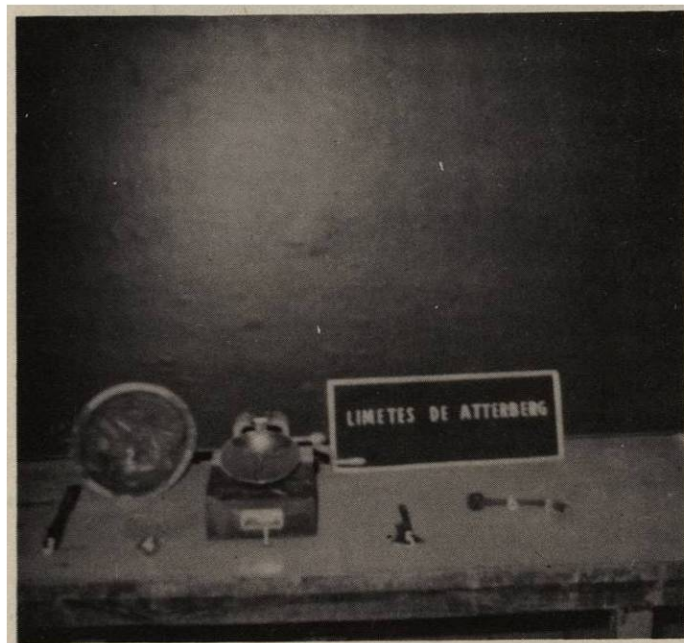


Figura 4.- Equipo utilizado para la determinación de los límites de Atterberg. Límite líquido: 1. Aparato de Casa Grande. 2. Muestra de suelo. 3. Espátula flexible de hoja de acero. 4. Vidrio de reloj. 5. Ranurador. 6. Espátula en forma de V utilizado para suelos arenosos.

Límite plástico.- Se fija por el contenido de agua con el cual un suelo puede moldearse en rollos de 3 mm. de diámetro hasta que comienza a agrietarse. (6)

Límite de contracción.- Es el contenido de agua que saturaría un suelo contraído por secamiento de evaporación. (6) La figura 5 muestra el equipo utilizado en su determinación.



Figura 5.- Equipo utilizado para determinar los límites de Atterberg. Contracción lineal. 1. Muestra de suelo. 2. Espátula flexible de hoja de acero. 3. Molde de lámina galvanizada del número 16. 4. Muestra de suelo secada y contraída. 5. Regla graduada.

Índice de plasticidad.- Es la diferencia que existe entre el límite líquido y el límite plástico.

Permeabilidad de los Suelos

La permeabilidad es la propiedad que tiene un suelo de dejar pasar el agua a través de él.

La permeabilidad a través de un suelo está basada en la Ley de Darcy, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V = KS$$

Donde:

V =	Velocidad de filtración.
K =	Coefficiente de filtración
S =	Gradiente hidráulico = $\frac{H}{L}$

H =	Pérdida de carga
L =	Espesor de la capa de suelo.

El conocimiento de la permeabilidad del suelo, expresado por el coeficiente K, tiene gran importancia en muchos problemas técnicos, como la capacidad de retención de agua de las presas de tierra, y se han ideado diferentes aparatos para su determinación. Dos son los más frecuentemente usados: El permeámetro de carga constante y el permeámetro de carga variable. El permeámetro de carga variable se usa corrientemente para suelos relativamente impermeables en los que el desague es muy pequeño, usándose el de carga constante en suelos más permeables, no obstante, aún para este tipo de suelos es preferible el de carga variable, pues los resultados que se obtienen con éste se hayan menos expuestos a errores por formación de burbújas de aire en el tubo de corrección. (7)

La permeabilidad obtenida por medio del permeámetro de carga variable se deduce por medio de la siguiente fórmula:(1)

$$V = \frac{2.3}{At} \log \frac{n_1}{n_2}$$

Siendo:

a =	Area del tubo capilar
l =	Longitud de la muestra de suelo
A =	Area de la muestra de suelo
t =	Tiempo en segundos
n1 =	Lectura de la altura superior
n2 =	Lectura de la altura inferior

Resistencia del Suelo al Esfuerzo Cortante

La resistencia del suelo al esfuerzo cortante se debe a la cohesión y a la resistencia friccional de las partículas que lo forman. Coloumb encontró que la

resistencia que ofrecen los cuerpos al deslizamiento es proporcional a la presión normal aplicada, representando esto en la siguiente cuestión: (6)

$$S = C + N \tan \Theta$$

siendo:

- S = Resistencia al esfuerzo cortante
- N = Esfuerzo normal
- Θ = Angulo de fricción interna
- C = Cohesión

Los valores de la cohesión y el ángulo de la fricción interna no son constantes, sino que dependen de varios factores que son el tiempo y el tipo de carga, y según que la aplicación de carga sea rápida o lenta.

Para obtener la resistencia al corte y el ángulo de fricción interna se reproduce el esfuerzo máximo a un noventa por ciento de compactación, para someter el suelo a una compresión.

Los valores del esfuerzo normal y el ángulo de fricción interna se representan gráficamente en el diagrama de Mohr (Figura 6) del cual se deduce la cohesión que posee el material.

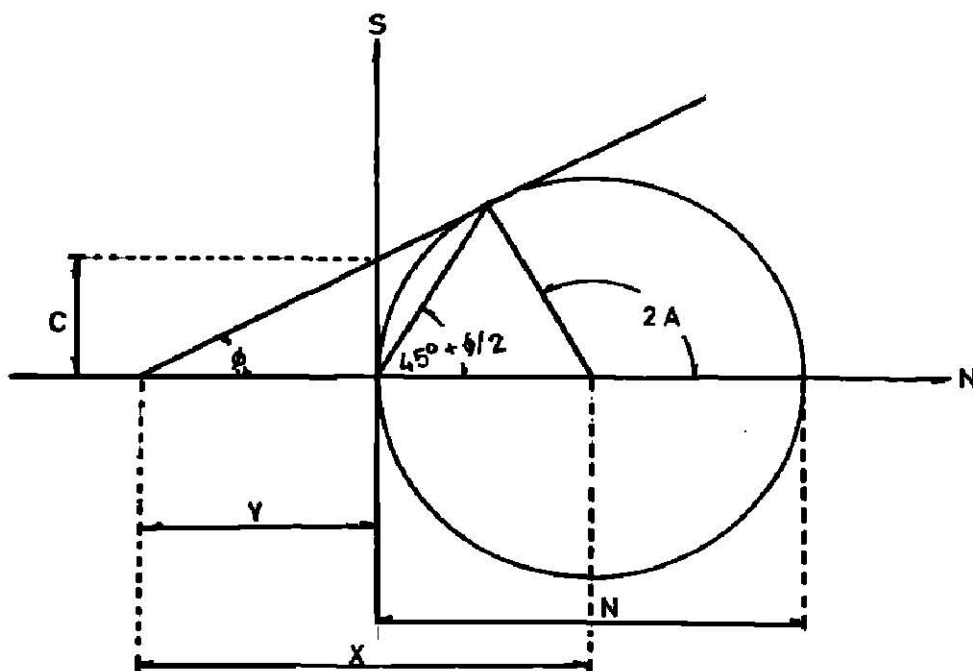


Figura 6.- Diagrama de Mohr.

Sobre el eje de coordenadas del diagrama de Mohr se toma el valor del esfuerzo normal, correspondiendo este valor al diámetro del círculo y tangente a este círculo se traza la recta que representa la ecuación de Coloumb

$$S = C + N \tan \Theta$$

Obtenido el punto de tangencia, se use a este punto con el extremo izquierdo del círculo donde la dirección del plano de falla que forma el ángulo de $45^\circ - \Theta/2$

Dibujando el diagrama de Mohr se mide el valor de la ecuación sobre el eje de ordenadas y el valor del esfuerzo cortante se deduce de la ecuación de Coloumb.

Peso Volumétrico Seco Máximo Proctor

Muchos tipos de construcciones de tierra, tales como presas, muros de retención y caminos, requieren rellenos que deben recibir un cierto grado de compactación. El compactar un suelo, es decir, llevarlo a un estado más denso, es deseable por tres razones:

- a) Disminuir asentamientos futuros
- b) Aumentar su resistencia al esfuerzo cortante
- c) Disminuir su permeabilidad.

Aunque los fundamentos de la compactación no han sido definidos completamente, se acepta que el agua juega una parte muy importante, especialmente en los suelos más finos.

Cuando se agrega agua a un suelo seco, sus partículas la absorben hasta saturarse, pero si la cantidad de agua que se agrega es mayor que la necesaria para su saturación, aparecerá una película de agua cubriendo cada partícula. Con la adición de más agua, esta película aumenta su espesor y permite que las partículas de suelo se deslicen unas sobre las otras con mayor facilidad. Este proceso es a menudo llamado lubricación y permite un cierto acomodo de las partículas cuando se sujeta a un esfuerzo de compactación.

Puesto que el espesor de la película de agua en una partícula gruesa es deseable en comparación con el diámetro de las partículas, los efectos de lubricación se limitan a los suelos finos.

Si se sigue incrementando la humedad empleando el mismo esfuerzo de compactación el agua adicional reemplaza el aire de los poros del suelo, llegándose a obtener el mejor acomodo de las partículas del mismo y por consecuencia, el mayor peso volumétrico seco con una cierta humedad: "humedad óptima".

Si se sigue incrementando la humedad se provoca un aumento del volumen de los poros ocasionándose una sustitución sucesiva de partículas de suelo por agua. En virtud de que el volumen de aire atrapado entre las partículas de suelo no puede ser disminuído apreciablemente con este mismo esfuerzo de compactación, se obtendrán, por consecuencia, pesos volumétricos secos que van siendo menores a medida que la humedad aumenta. (1)

La figura 7 representa el equipo utilizado para obtener el peso volumétrico seco máximo Proctor y la humedad óptima de compactación.



Figura 7.- Equipo utilizado para obtener el peso volumétrico seco máximo Proctor. 1. Malla #4. 2. Muestra de suelo. 3. Probeta graduada 1,000 c.c. 4. Molde de comparación. 5. Collarín del molde de compactación. 6. Cucharón. 7. Pisón metálico. 8. Balanza de 20 Kg. de capacidad. 9. Espátula de hoja flexible. 10. Cápsulas. 11. Regla metálica con arista cortante.

El peso volumétrico húmedo se obtiene por la siguiente fórmula:

$$Y_w = \frac{P_l - P_t}{V}$$

donde:

Y_w	=	Peso volumétrico húmedo en Kg./m ³
P_t	=	Peso del molde en gramos
P_l	=	Peso del material compactado más el peso del molde en gramos.
V	=	Volumen del molde en litros.

El peso volumétrico seco se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$Y_s = \frac{Y_w \times 100}{100 + W}$$

donde:

Y_s	=	Peso volumétrico seco, en gramos sobre litro ó Kgs. sobre m ³ .
W	=	Humedad del espécimen compactado.

Los pesos volumétricos secos obtenidos y las humedades correspondientes se utilizan para trazar la curva peso volumétrico seco-húmedo, marcando con el eje de las coordenadas, a escala logarítmica, los pesos volumétricos, y en el eje de las abscisas, a escala aritmética, los contenidos de humedad. Estos valores están representados en la figura 8. El punto superior de la curva resultante representa el peso volumétrico seco máximo para el material estudiado. La humedad correspondiente a este peso volumétrico representa el contenido óptimo con el cual se obtiene dicho peso volumétrico. Dentro de la figura 8 se incluye la curva de saturación teórica, llamándose también curva de cero vacíos.(1)

Línea de Saturación en Presas de Tierra

La línea que limita una corriente de humedad hacia arriba es llamada línea de saturación, línea de escape o coladura, o a veces llamada línea freática.

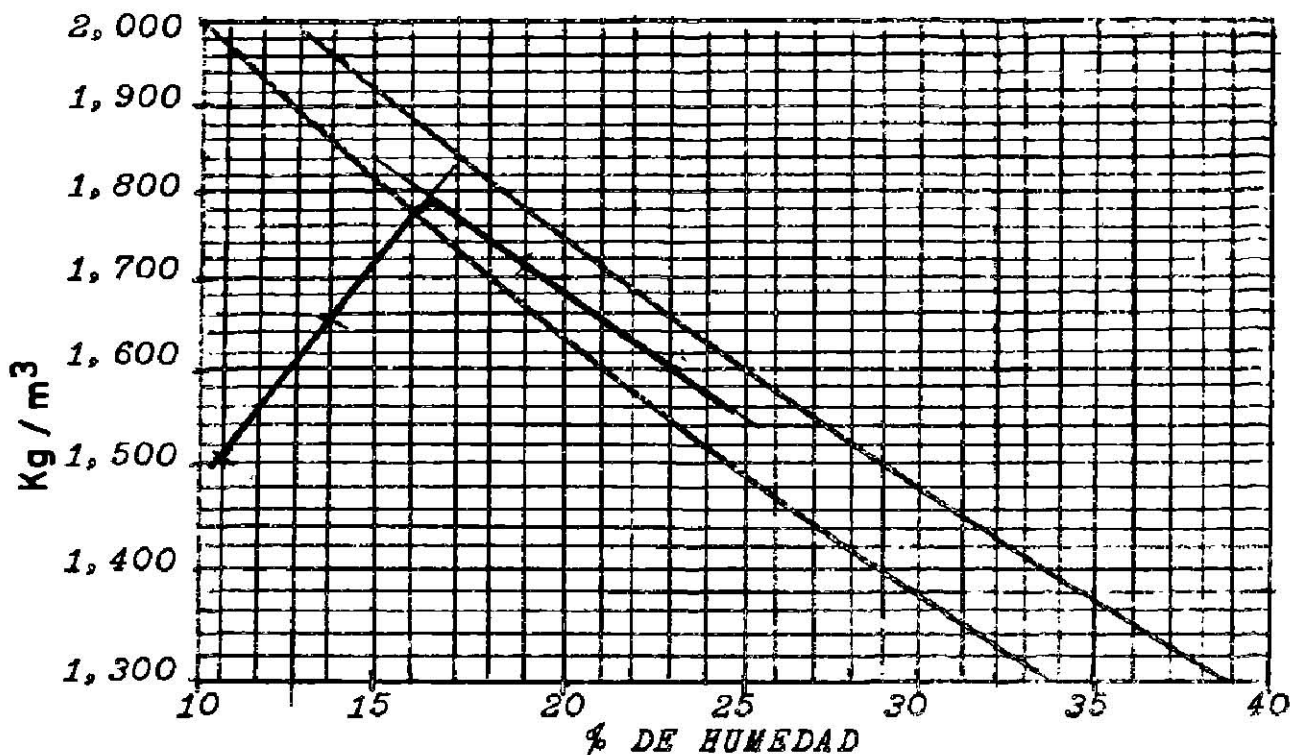


Figura 8.- Gráfica de la curva teórica peso volumétrico seco-húmedo

La línea de saturación sigue una forma parabólica y su ecuación se da en coordenadas polares (figura 9), con origen en el foco A:

$$p (1 - \cos\Theta) = \text{constante} \quad (I)$$

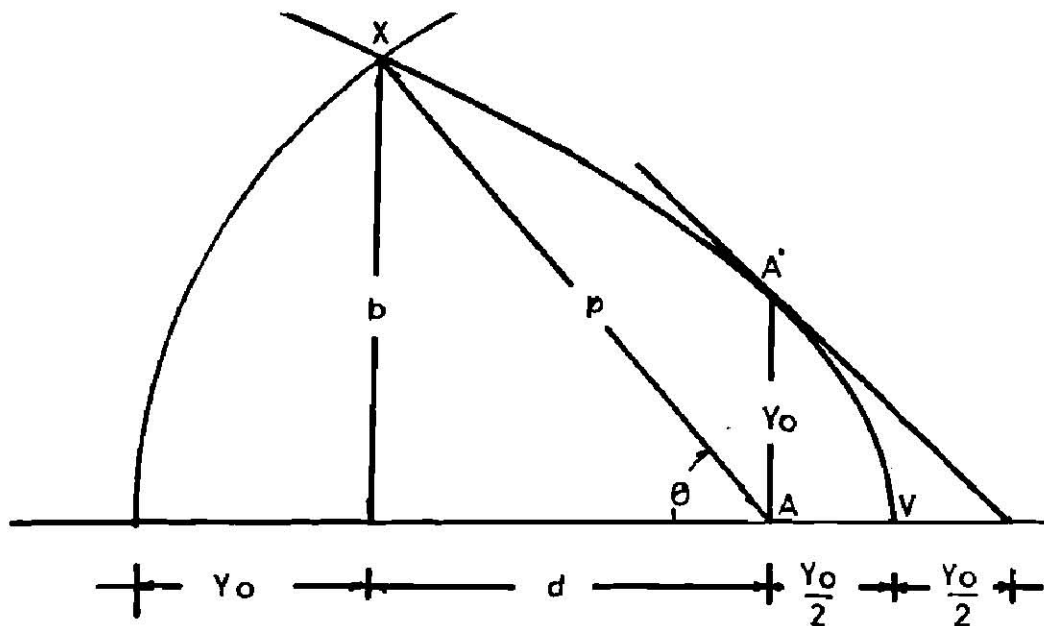


Figura 9.- Parábola en coordenadas polares p y Θ (con origen en el foco A)

Suponiendo que la línea de saturación pasa a través de un punto dado X, distante del foco d horizontalmente, y b verticalmente. Designando con Yo la ordenada AA' correspondiente al foco A haciendo $\theta = 90^\circ$ por la fórmula I

$$\text{Cos } \theta = 0 \qquad p = Y_o = \text{ constante}$$

Por otra parte en el punto X:

$$p = \sqrt{d^2 + b^2} \qquad p \text{ Cos } 0 = d$$

Por lo tanto:

$$Y_o = \sqrt{d^2 + b^2} - d \qquad \text{(II)}$$

Esto es conocido que: (a) la ordenada focal AA' igual a Yo equivalente a dos veces la distancia, del foco A al vértice V de la parábola y (b) que el vértice de una parábola divide en dos a la subtangentes. Usando esta propiedad y trazando una tangente a la parábola en el punto A' se puede concluir que el talud de esta tangente es igual a una unidad.

De acuerdo con lo propuesto por A Casa Grande, la línea de saturación de la falla parabólica (a veces llamada parábola básica) es considerada como la línea de saturación en las presas (figura 10). La parábola básica es entonces conectada con la curva de la corriente superior y la curva de la corriente interior de la presa para ajustarse a las condiciones límites.

Esto es ejecutado en la siguiente manera: La parábola básica se asume que empieza en el punto B de la corriente superior del nivel del agua. Este punto es determinado dado la condición que la línea vertical BM divide el talud BoMo en dos partes; esto es:

$$BoM = 0.3 BoMo$$

Bo es en realidad el punto por donde el agua entra a la cortina de la presa. La distancia que conecta BoBo' es simplemente diseñada para unir la parábola básica al punto Bo'. La curva BoBo' deberá ser normal a la curva de la corriente superficial, la cual es una línea equipotencial.

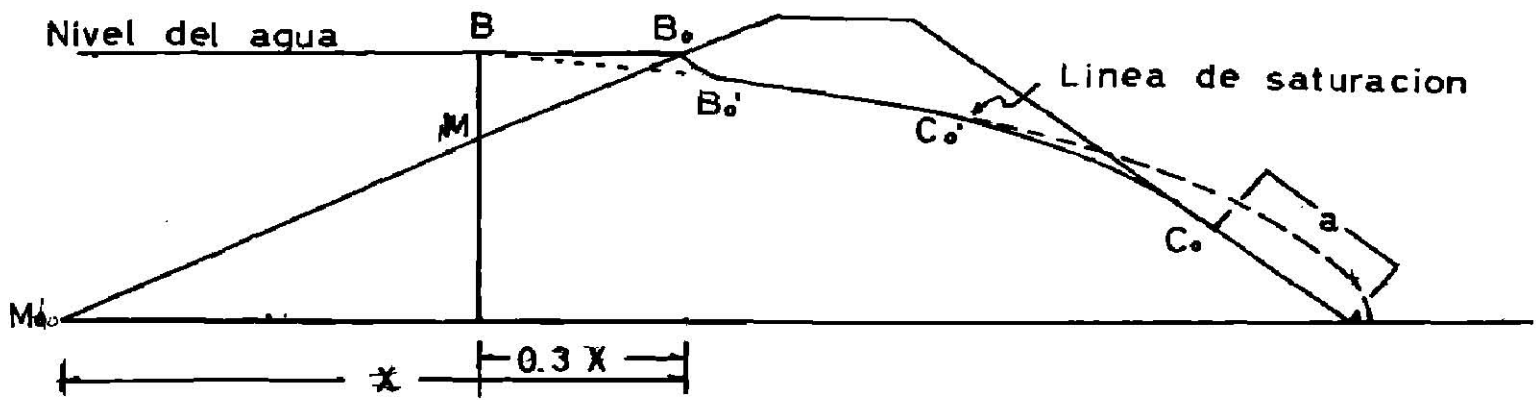


Figura 10.- Línea de saturación en presas de tierra (las distancias B_0B_0' y C_0C_0' son simplemente diseñadas).

Para conectar la parábola básica con la curva de la corriente interior de la presa, se ha tomado ventaja del estudio de numerosas corrientes netas dibujadas bajo la supervisión de A Casa Grande. La distancia del foco A al punto C_0 donde la línea de saturación toca la curva de la corriente interior está conectada con el vector radial de la parábola básica por la relación:

$$a = p(1 - C) \quad (III)$$

Donde C es una fracción dependiente del valor del ángulo θ dado por la curva de la corriente interior con el horizonte.

Combinando la ecuación I con la ecuación III tenemos que:

$$a = Y_0 \frac{1 - C}{1 - \cos \theta} \quad (IV)$$

Al usar la ecuación IV el valor de Y_0 está computado primero por la ecuación II y después multiplicado por el radio $\frac{1 - C}{1 - \cos \theta}$ el cual se lee en la figura 11.

Deberá siempre recordarse que la línea de saturación no representa un límite agudo de un suelo mojado, dado que vertical a ésta existe una faja de suelo parcialmente saturado por la presencia de humedad higroscópica y capilar. (3)

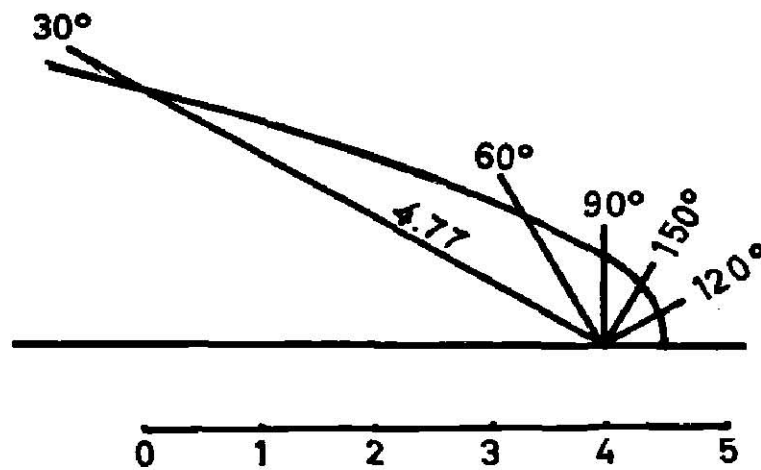


Figura 11.- Gráfica de los valores $\frac{1 - C}{1 - \cos \theta}$ usados en la construcción de la línea de saturación en presas de tierra.

Demostración Analítica de los Diferentes Puntos en que se Basa la Ecuación de A Casa Grande

Se pueden demostrar analíticamente los diferentes conceptos en que se basa la ecuación de Casa Grande.

Primeramente tenemos que la formula I establece que $Y_0 = \sqrt{d^2 + b^2} - d$
 Esto se puede demostrar de la siguiente manera:

Tomando la parábola de la figura 12 establecemos que la distancia del foco al punto D de la parábola es igual a $\sqrt{d^2 + b^2}$ y que la distancia del punto D a la directriz de la parábola es igual a la distancia BA de donde:

$$DF = DG = BA$$

$$\frac{Y_0}{2} + \frac{Y_0}{2} + d = \sqrt{d^2 + b^2}$$

$$Y_0 = \sqrt{d^2 + b^2} - d$$

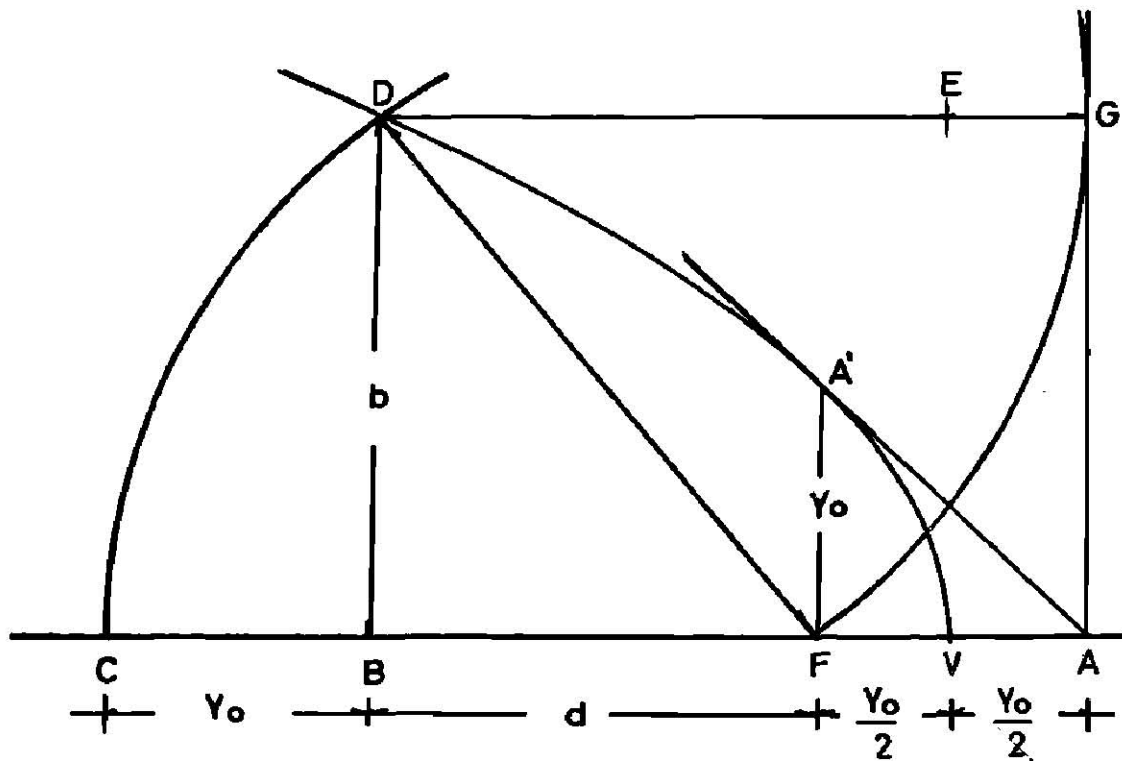


Figura 12.- Parábola con foco ($Y_0/2, 0$) y vértice ($0, 0$)

En la misma figura 12 se establece que la distancia $CB = Y_0$

Tomando la distancia DG se establece que es igual a $DE + Y_0/2$. Por otra parte, DE es igual a $FB + Y_0/2$ y como $DG = CF$ tenemos:

$$FB + Y_0/2 + Y_0/2 = FB + CB$$

$$Y_0 = CB$$

Otra condición establecida, es que la tangente AA' es igual a una unidad.

Derivando la ecuación de una parábola tenemos lo siguiente:

$$Y^2 = 4Px$$

$$Y' = \frac{2P}{y}$$

Haciendo $Y = Y_0$

y

$P = FV = Y_0/2$

Obtenemos $Y' = Y_0/Y_0 = 1$

MATERIALES Y METODOS

Para hacer los modelos de las presas de tierra a escala se utilizó una caja experimental de vidrio reticulada a 5 cm. con estructura de acero con las siguientes dimensiones:

Medidas	Exterior cm.	Interior
Largo	250	245
Ancho	28	18
Altura	50	49

Los materiales que se seleccionaron para la construcción de los modelos de las presas de tierra para estudiar el efecto de la textura del material sobre la línea de saturación, consistieron en 5 suelos con texturas diferentes.

El análisis granulométrico efectuado por el método del hidrómetro en los 5 suelos estudiados, así como las clases texturales, se dan en la Tabla II.

TABLA II. ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

Suelo	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
A	56.44	26.72	16.84	Migajón arenoso
B	37.72	28.72	33.56	Migajón arcilloso
C	25.16	29.00	45.84	Arcilloso
D	11.72	28.34	59.94	Arcilloso
E	37.16	30.72	32.12	Migajón arcilloso

En otras pruebas mecánicas efectuadas en el laboratorio de mecánica del suelo de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.N.L. para los mismos suelos, se obtubieron los resultados que se resumen en la tabla III.

Para compactar el suelo al momento de hacer los modelos en la caja de vidrio, se utilizó un pisón de madera.

TABLA III.- ANALISIS MECANICO DE LOS 5 SUELOS ESTUDIADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO DE MECANICA DEL SUELO EN LA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA U.N.L.

	Suelos				
	A	B	C	D	E
Peso volumétrico seco máximo Proctor (K_r/m^3)	1870	1900	1540	1540	1740
Humedad óptima de compactación (%)	13	13	22.8	24.7	17.5
Densidad relativa (gr/cm^3)	2.68	2.64	2.61	2.54	2.62
Esfuerzo Normal (kg/cm^2)	0.401	0.567	0.667	0.335	1.36
Angulo de falla	75°	67°	65°	67°	61°
Angulo de fricción interna	20°	30°	40°	26°	32°
Límite líquido (%)	26.8	20.0	43.0	48.8	31.0
Límite plástico (%)	26.8	20.0	21.1	17.2	14.4
Contracción lineal (%)	2.0	4.0	12.0	16.5	7.0
Materia orgánica (%)	0.07	1.17	4.41	2.00	3.52
Permeabilidad ($cm/seg.$)	5.5×10^{-5}	10.2×10^{-5}	2.6×10^{-5}	8.2×10^{-5}	1.9×10^{-5}

Nota: Posiblemente los valores correspondientes al ángulo de fricción interna estén un poco elevados, puesto que al hacer la determinación del esfuerzo normal y el ángulo de falla al suelo se le hizo una compactación al 90% Proctor; por tal motivo, esto posiblemente influyó al hacer la determinación.

Como colorante aplicado al modelo para que se marcara mejor la línea de saturación se usó Floresceína (0.5 gr. por litro de agua), la cual se aplicó con un dispositivo especial consistente en un depósito con una llave de donde se conectó una manguera, la cual se introdujo dentro del talud 3:1 hasta una profundidad de 7 cms. en diferentes puntos de dicho talud.

Construcción de los Modelos de Presas

Primeramente se tamizó el suelo pasándolo por un tamiz de malla 3. Para formar dentro de la caja experimental las presas con taludes 2:1 y 3:1 se agregó la tierra en 6 capas (con un 5% de humedad) dándole un cierto grado de compactación (aproximadamente un 90%). La compactación dada se midió en función del número de golpes dados con el pisón de madera en cada una de las capas.

A continuación se presenta la compactación dada a las 6 capas de tierra:

Capas	Golpes con el pisón de madera
1	500
2	400
3	300
4	300
5	300
6	200

Una vez terminada la formación de la presa, y antes de aplicar el agua, se probó el dispositivo para aplicar colorante, para asegurar su funcionamiento.

El agua se agregó por el talud 3:1 hasta una altura de 35 cm. manteniéndose una carga constante hasta finalizar cada repetición.

Una vez que el agua se había infiltrado hasta pasar el punto donde se encontraba puesto el colorante dentro de la presa de tierra, se abrió la llave para aplicar el colorante, el cual marcaría una curva dentro de la presa.

El colorante se aplicó en cada repetición en distintos puntos del talud 3:1; uno muy cerca del punto que establece Casa Blanca en su ecuación, donde pasa la línea de saturación; el otro en la parte intermedia de dicho talud.

En las 5 repeticiones que se hicieron para cada tipo de suelo, varió en posición la aplicación del colorante para la línea de saturación, y posteriormente con las 5 líneas localizadas se obtuvo la representación de dicho suelo. Este procedimiento se llevó a cabo con los 5 suelos estudiados.

RESULTADOS Y DISCUSION

En las figuras 13, 14, 15, 16 y 17 se muestra la secuencia que siguió el agua al infiltrarse en las presas correspondientes a los suelos A, B, C, D y E, respectivamente. Se puede observar una gran diferencia entre cada una de las líneas de saturación para cada uno de los suelos, notándose que estas curvas tienen una similitud por lo que respecta al punto que tocan en el talud 2:1.

Puesto que el colorante fué aplicado en puntos diferentes sobre el talud 3:1, en estas mismas gráficas se muestran dos curvas para cada repetición: una la línea de saturación y otra la línea intermedia de flujo.

Para este trabajo se estudió solamente lo relacionado con la línea de saturación. En las figuras 18 y 19 se muestra la secuencia del colorante en las distintas repeticiones.

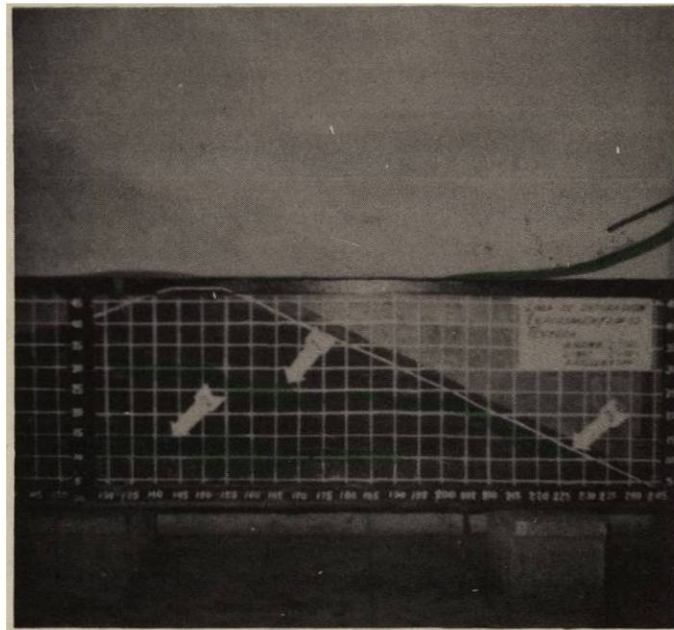


Figura 18. Curvas producidas por el colorante (Floresceína) sobre un modelo de presa. 1. Línea de saturación. 2. Línea intermedia de flujo y 3. Punto en el que tocó el colorante el talud 2:1.

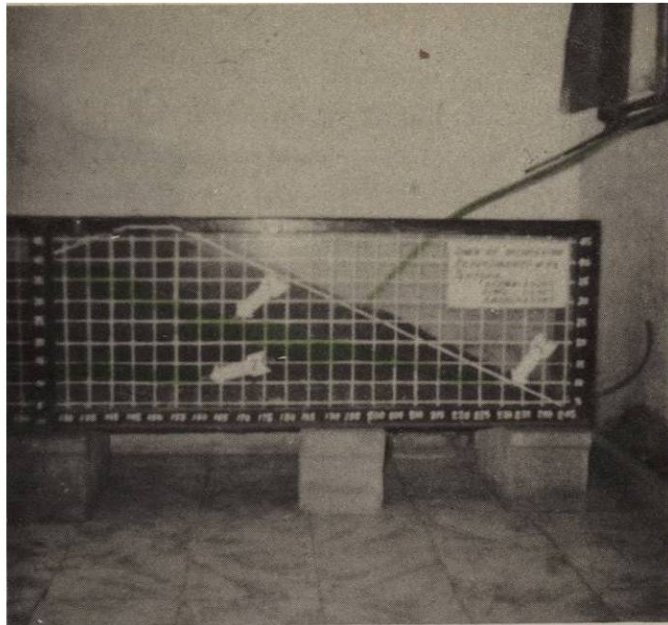


Figura 19.- Curva producida por el colorante (Floresceína) sobre un modelo de presa. 1. Línea de saturación. 2. Línea intermedia de flujo. 3. Punto en que tocó el colorante el talud 2:1.

Con los resultados de las curvas de saturación obtenidas en las 5 repeticiones, se calculó una línea representativa (curva de regresión) para cada uno de los suelos. En la Tabla IV se dan los valores constantes de X y los valores variables de Y, tomados de las gráficas 13, 14, 15, 16 y 17, donde se presentan las 5 repeticiones para los suelos A, B, C, D, y E. También se dan las fórmulas usadas para el cálculo de la línea de regresión correspondiente a cada suelo.

En la tabla V se presentan los valores obtenidos con las fórmulas (1, 2, 3, 4, y 5) para el trazo de la curva de regresión para cada uno de los suelos. Los valores de Y' se obtuvieron usando como valores de X en la fórmula (5) de la Tabla IV y los valores fijos de X previamente establecidos (135, 120, 100, 75, 50 y 25).

TABLA IV.- VALORES CONSTANTES DE X Y VALORES VARIABLES DE Y CORRESPONDIENTES A LAS 5 REPETICIONES PARA LOS SUELOS A, B, C, D Y E

S u e l o s

Rep.	X	Log. X	S u e l o s				
			A	B	C	D	E
1	135	2.1303	33.3	31.5	32.0	31.9	35.0
	120	2.0791	32.5	30.0	31.0	29.9	34.2
	100	2.0000	31.0	28.0	29.5	27.0	32.5
	75	1.8750	26.0	24.0	25.2	20.5	26.0
	50	1.6989	19.5	19.5	19.0	18.0	19.5
2	25	1.3979	12.0	12.0	11.9	11.5	12.1
	135	2.1303	25.0	32.5	35.0	33.7	33.0
	120	2.0791	34.5	31.0	34.5	31.5	31.0
	100	2.0000	32.5	30.0	31.7	28.5	28.5
	75	1.8750	28.2	27.5	27.0	24.8	24.0
3	50	1.6989	22.0	23.0	20.0	21.0	18.5
	25	1.3979	12.2		12.5	12.5	12.5
	135	2.1303	32.0	32.5	34.5	35.0	34.0
	120	2.0791	30.5	32.1	32.5	32.0	32.0
	100	2.0000	27.5	30.0	26.6	28.5	29.0
4	75	1.8750	23.5	26.0	21.5	25.0	25.0
	50	2.6989	18.0	20.0	20.0	20.0	19.0
	25	1.3989	11.6	12.0	12.5	12.0	12.0
	135	2.1303	32.5	30.5	33.8	30.0	33.5
	120	2.0791	32.2	29.5	31.5	29.0	32.0
5	100	2.0000	30.9	27.0	28.5	27.5	30.0
	75	1.8750	25.5	22.0	22.5	24.0	25.0
	50	1.6989	19.5	16.5	17.0	18.5	19.0
	25	1.3979	12.0	11.0	11.5	11.0	12.0
	135	2.1303	31.5	31.5	35.0	33.5	32.2
120	2.0791	28.2	30.5	34.5	21.0	31.0	
100	2.0000	26.7	28.0	31.7	27.5	28.5	
100	2.0000	26.7	28.0	31.7	27.5	28.5	
75	1.8750	22.6	23.5	27.0	26.0	25.0	
50	1.6989	18.0	18.5	21.0	18.5	20.0	
25	1.3979	11.6	11.5	12.5	11.5	12.5	

$$M \text{ Log } X = \frac{\text{Log } X}{n} \quad (1)$$

$$My = \frac{\sum}{n} \quad (2)$$

$$b = \frac{E \log xy - n (M \log X My)}{E \log x^2 - n (M \log X)^2} \quad (3)$$

$$a = My - b (M \log x) \quad (4)$$

$$y = a + b \text{ Log } x \quad (5)$$

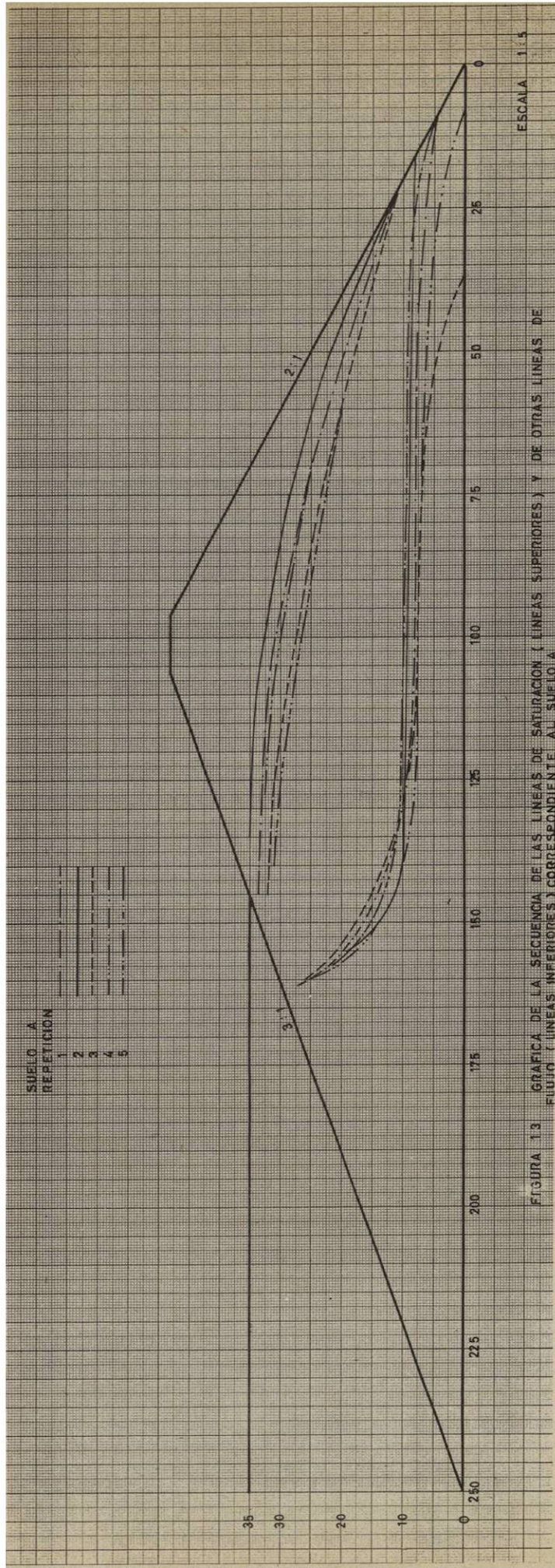
TABLA V.- VALORES OBTENIDOS PARA EL TRAZO DE LA CURVA DE REGRESION DE LOS SUELOS
 A, B, C, D Y E

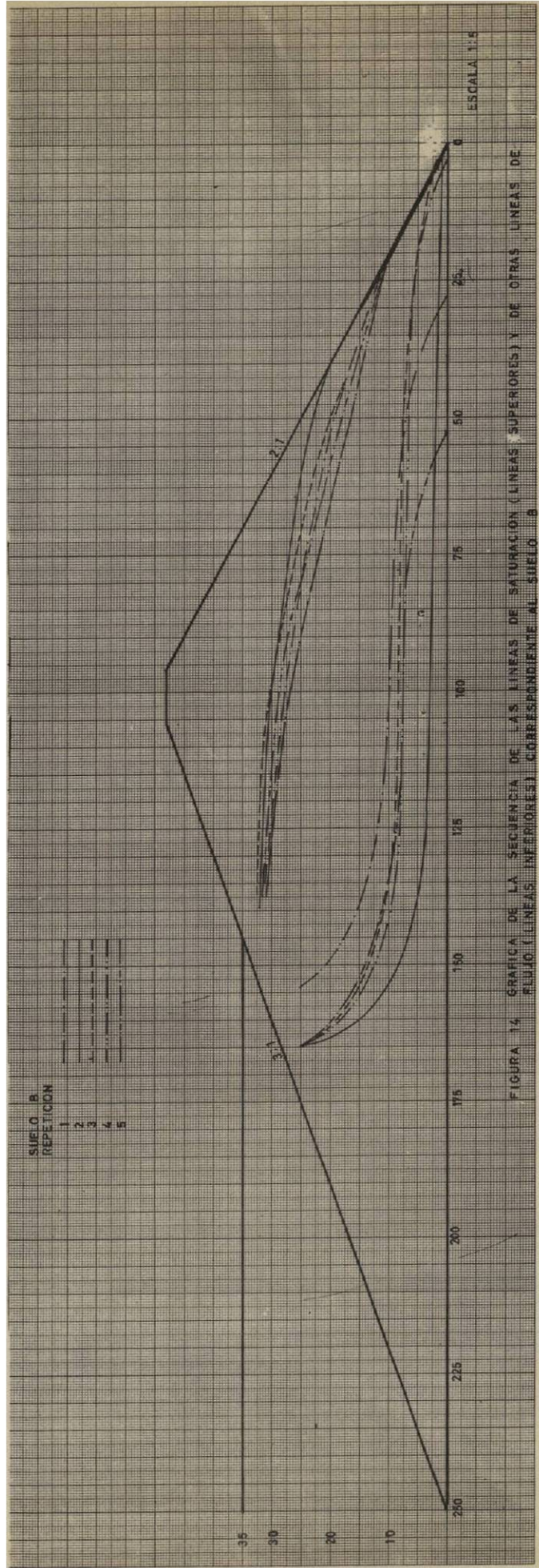
	Suelo A	Suelo B	Suelo C	Suelo D	Suelo E
M Log X (1)	1.8635	1.8795	1.8635	1.8635	1.8635
My (2)	25.066	25.88	25.44	24.46	25.28
b (3)	29.5064	26.9506	30.6869	28.9794	29.88
a (4)	29.919	27.652	31.745	29.5431	30.4013
y (5) cuando X = 135	32.938	31.889	33.627	32.1917	33.2520
y " X = 120	31.427	30.458	32.056	30.7079	31.7222
y " X = 100	29.093	28.248	29.628	28.4157	29.3567
y " X = 75	25.405	24.754	25.793	24.7932	25.6237
y " X = 50	20.209	19.832	20.388	19.6900	20.3618
y " X = 25	11.327	11.419	11.152	11.0000	11.3679

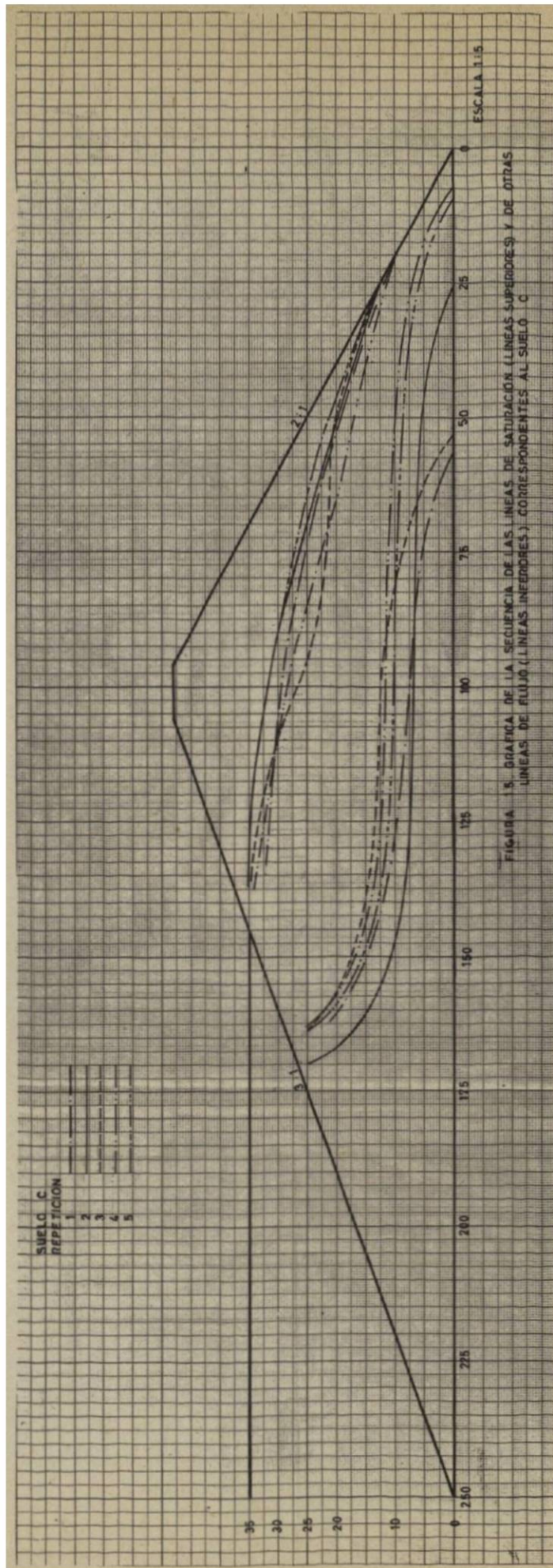
En las figuras 20, 21, 22, 23 y 24 se representa las líneas de saturación obtenidas por la fórmula Casa Grande y se comparan con la línea de saturación obtenida por el método utilizado en este estudio. Se puede establecer que la curva que más se acerca a la parábola básica es la de la figura 21, correspondiente al suelo B, y que las otras curvas se comportan en una forma muy parecida.

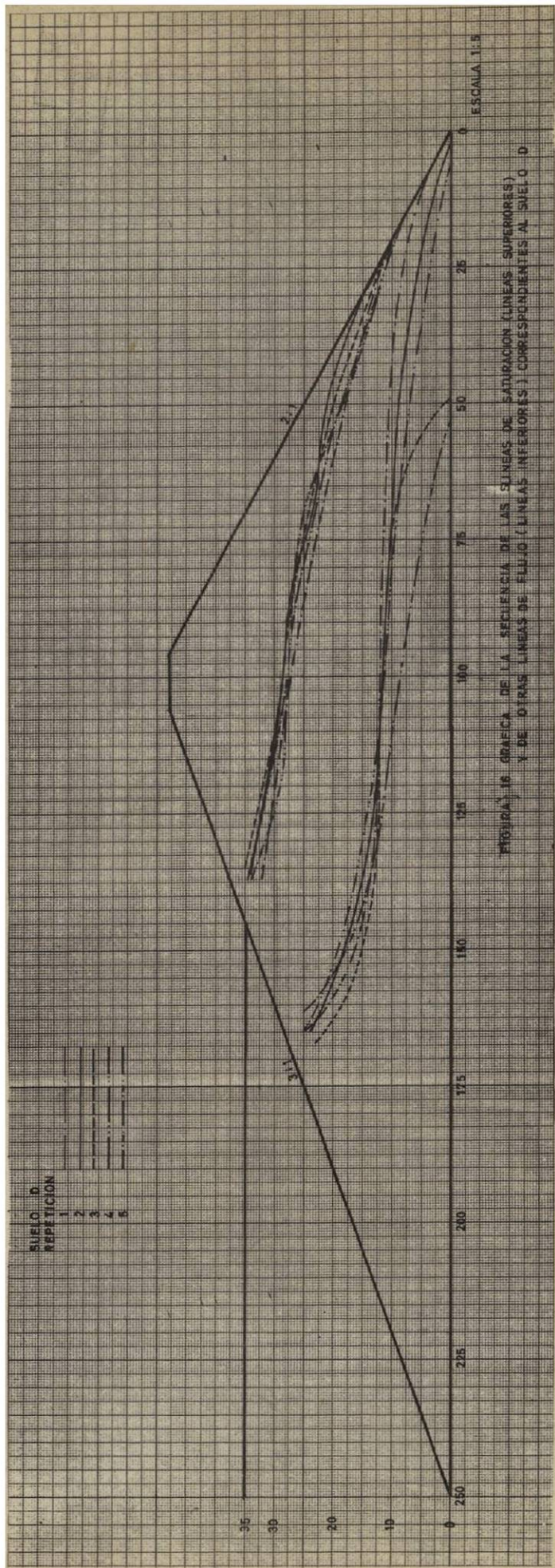
Para la mayor parte de los casos se obtuvo una distinción "a" mayor en un 20% aproximadamente de la propuesta por la fórmula, por lo que se podría sugerir racionalmente, la media de ésta o sea un 10%.

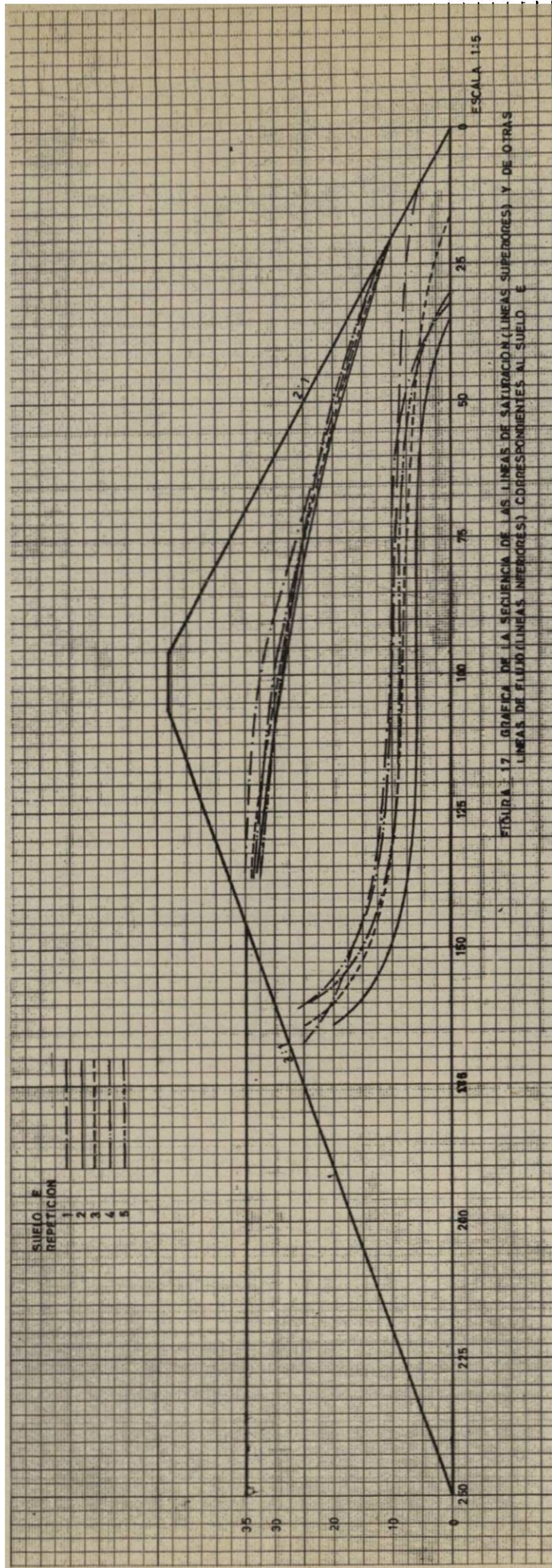
Los valores especificados en la Tabla III, aunados al resultado del presente trabajo se consideran como la información necesaria para emprender cualquier proyecto de construcción de una cortina.

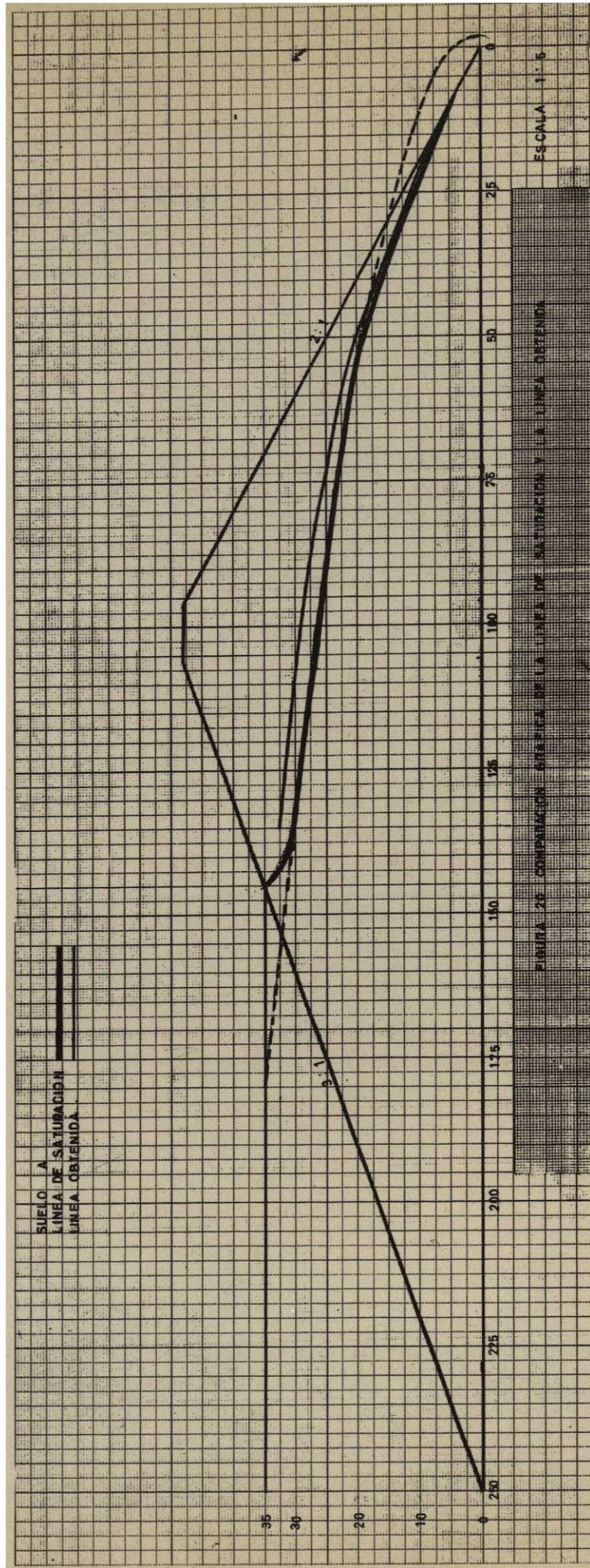












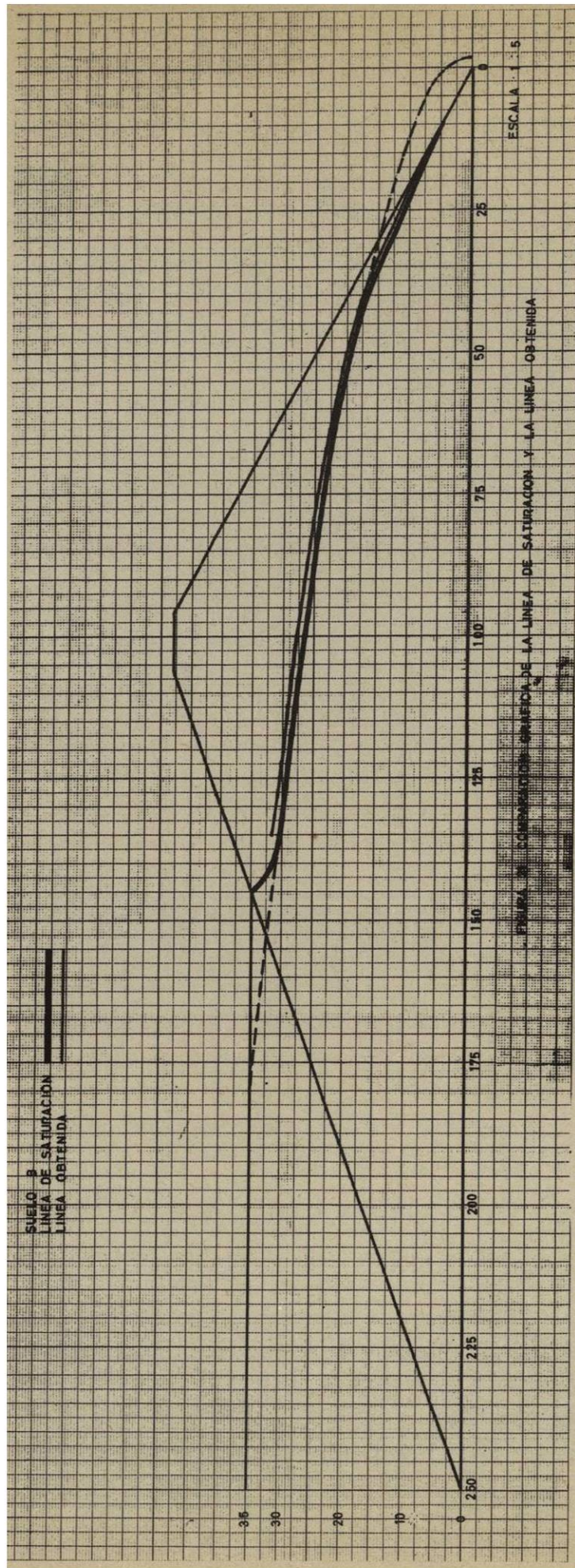
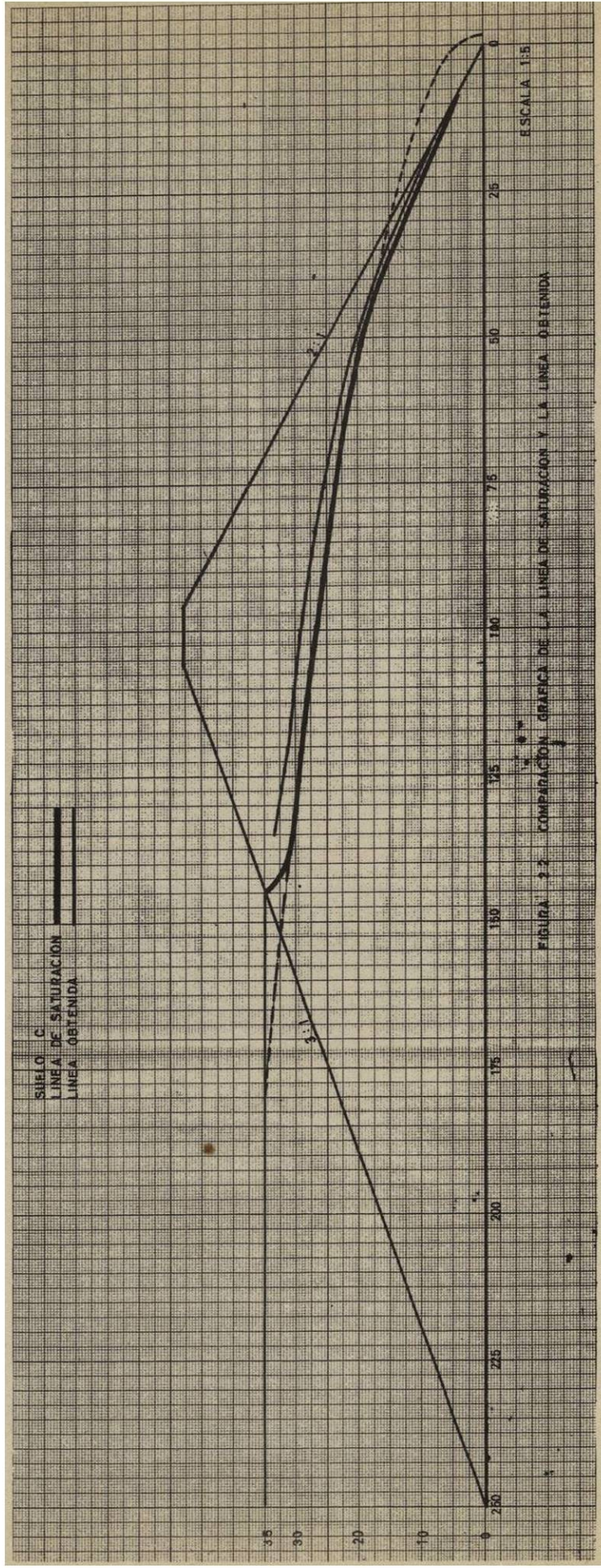
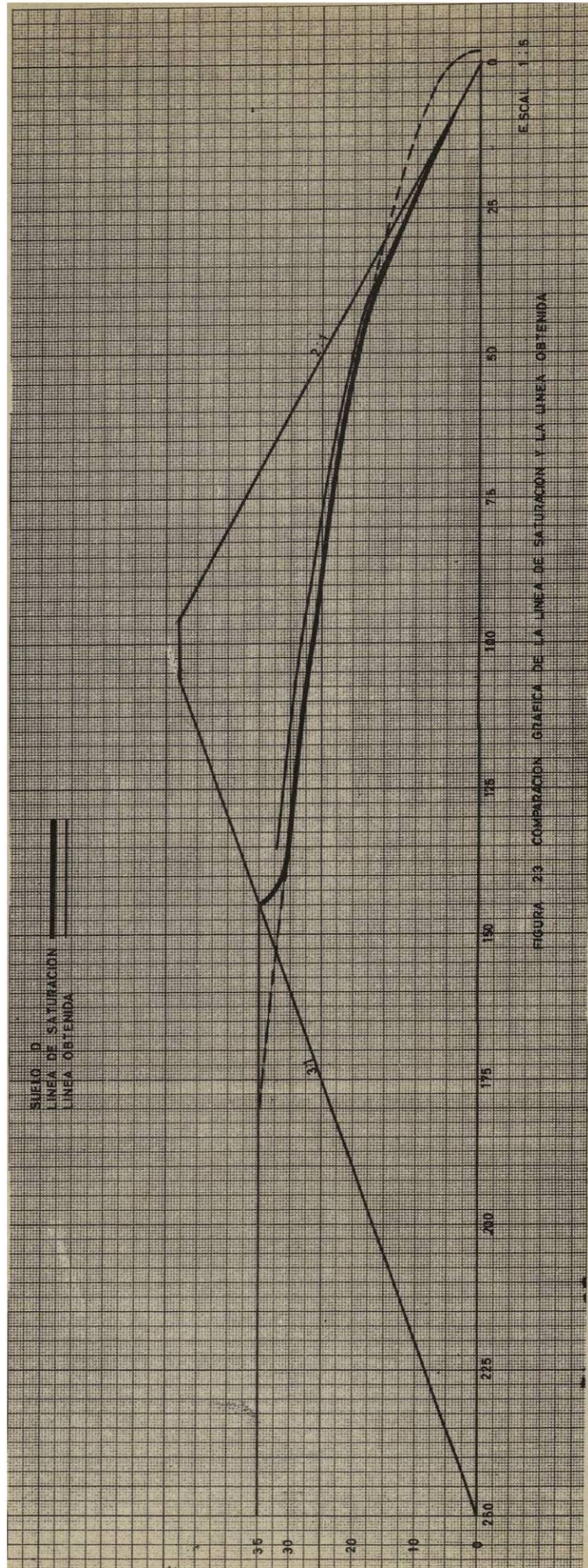


FIGURA DE COMPARACION ENTRE LA LINEA DE SATURACION Y LA LINEA OBTENIDA





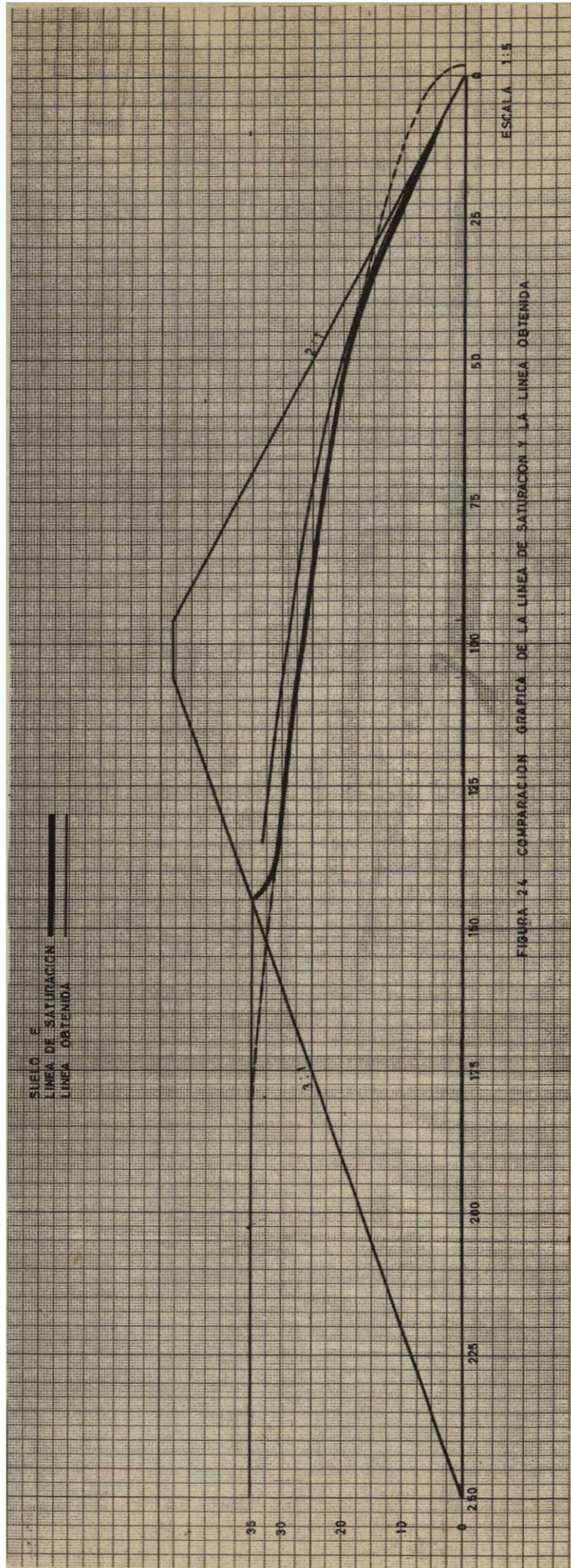


FIGURA 24. COMPARACION GRAFICA DE LA LINEA DE SATURACION Y LA LINEA OBTENIDA

CONCLUSIONES

La línea de saturación sigue una forma parabólica, como está indicada en la ecuación de Casa Grande.

1.- La línea de saturación se encontró por arriba de la línea de saturación especificada por Casa Grande para todos los suelos estudiados en este trabajo. Esto puede deberse a la influencia de capilaridad.

2.- La distancia de flujo del agua interna en casi todos los casos resultó ser un 20% mayor; lo cual está de acuerdo con el punto anterior.

3.- El punto inicial de la parábola coincide con el punto de intersección del nivel del agua y el talud.

RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo obtenido en la primera conclusión, el punto inicial de la parábola que representa la línea de saturación debe formarse en el punto de intersección entre el nivel del agua y el talud.

La distancia de flujo del agua interna del talud aguas abajo deberá ser incrementado en un 10% de la ecuación dada por Casa Grande.

Efectuar trabajos de investigación similares en que se estudien secciones de cortinas con corazones arcillosos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Anónimo. Manual de Laboratorio de Mecánica del Suelo. Facultad de Ingeniería Civil.
- 2.- Buckman y Brady. Naturaleza y Propiedades de los Suelos. Editora U.T.E.H.A.
- 3.- Krynine D.P. Soil Mechanics its Principles and Structural Applications . Second edition. New York and London . Mc Grow-Hill Book Company Inc. (1947)
- 4.- Matabuena López R. Estudio Físico y Químico de los Suelos de la Zona Oeste del Bajío. (tesis). Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México, D.F. 1965.
- 5.- Nicollier V.S. Mecánica del Suelo. Edición 1a. Rosario República Argentina. 1940.
- 6.- Treviño de la Cruz G.R. Análisis de Estabilidad en Presas de Tierra (tesis) Facultad de Agronomía U.N.L. Diciembre de 1963.
- 7.- Tschebotarioff G.P. Mecánica del Suelo. Ediciones Aguilar, S.A.

