

01149 CS13  
Duplicado

38

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

D.E.P.F.I.

FACTORES QUE AFECTAN LA PRUEBA DE CONSOLIDACION

FRICCION LATERAL

EJEMPLAR UNICO

DIRECTOR DE TESIS: DR. LEONARDO ZEEVAERT W.

ALUMNA: SONIA CRISTINA POSADA BOLIVAR.

MEXICO, ENERO DE 1985.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

9149

FACTORES QUE AFECTAN LA PRUEBA DE CONSOLIDACION,  
FRICCION LATERAL, HINCHAMIENTO.

T E S I S

que presenta

SONIA CRISTINA POSADA BOLIVAR

para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(Mecánica de Suelos)

J U R A D O

DR. LEONARDO ZEEVAERT WIECHERS . . . . .



DR. EULALIO JUAREZ BADILLO. . . . .



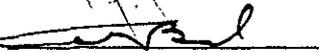
DR. JORGE ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ. . . . .

 15 II 85

ING. GUILLERMO SPRINGALL CARAM. . . . .

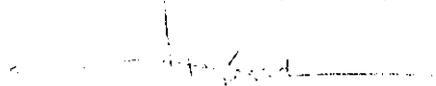


M en I RAMON CERVANTES BELTRAN. . . . .



EL COORDINADOR DE LA SECCION

EL SECRETARIO ACADEMICO

  
DR. J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ

  
M en I GABRIELLA MOELLER DE JALIFE

Cd. Universitaria, D.F., febrero de 1985

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A Wilmer,  
Como testimonio de amor,  
su gran apoyo y estímulo  
siempre me acompañaron.

A mis padres,  
Arturo y Adelita  
Con todo el amor y admiración  
que les profeso.

A mis hermanos,  
Carlos Arturo y Adelita  
con cariño.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mis agradecimientos a las siguientes personas por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo.

- Al Dr. Leonardo Zeevaert Wiechers, Director de Tesis, sus consejos y recomendaciones resultan imponderables, lo mismo que la ayuda recibida de su despacho donde realicé todo el trabajo de laboratorio.
- Al Dr. J. Abrahám Díaz Rodríguez, Jefe de la Sección de Mecánica de Suelos de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, por su valioso apoyo y su actitud siempre diligente y colaboradora.
- Al Dr. Eulalio Juárez Badillo, Por su aporte a este trabajo con sus consejos y comentarios.
- A todos los compañeros y personal de la Sección de Mecánica de Suelos, por su amplia colaboración y estímulo para el logro de este objetivo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# CONTENIDO

	PAGINA
Capítulo I. <u>INTRODUCCION</u>	1
. Lista de Referencias	3
Capítulo II. <u>BREVE RESEÑA HISTORICA</u>	4
. Comentarios a los Autores	12
Capítulo III. <u>FUNDAMENTO TEORICO</u>	15
. III.1 Conceptos Básicos	15
. III.2 Fundamento Teórico	18
a. Determinación Esfuerzo Normal	20
b. Determinación Factor de Corrección	23
c. Influencia de la Cohesión en la interfase	25
d. Círculo de Morh - Coulomb	25
Capítulo IV. <u>INVESTIGACION DE LABORATORIO</u>	30
. IV.1 Aparato de Corte Directo	30
. IV.2 Procedimiento	31
a. Labrado de la Probeta	31
b. Montaje de la Prueba	31
c. Realización de la Prueba	32

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

	PAGINA	
IV.3	Modalidades de la Prueba	
	a Obtención del $\phi_r$	34
	b Obtención del $\phi_r$	34
	c Obtención del $\phi_i$ con grasa de Silikón	35
IV.4	Programación de las pruebas	36
	a Material Empleado	36
	b Clasificación de las Pruebas	36
	c Resultados obtenidos. Tablas y Gráficas	37
IV.5	Crítica al Aparato de Corte	45
Capítulo V	V. a. Conclusiones	47
	v. b. Recomendaciones	51
<b>Referencias</b>		
Apéndice A:	Nomograma - Obtención del Factor de Corrección.	55
Apéndice B:	Ejemplo: Corrección por fricción a una curva de Compresibilidad	58
Apéndice C:	Registro de observaciones de Laboratorio - Hojas de trabajo.	62
	c.1. Nomenclatura Empleada	62
	c.2. Calibración Aparatos de Corte	64
	c.3. Curvas de Consolidación.	68

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## LISTA DE SIMBOLOS

A	=	Area
B	=	Parámetro
e	=	Relación de Vacíos
%S	=	Grado de Saturación
H	=	altura
Ip	=	Índice de Plasticidad
L.L	=	Límite Líquido
L.P	=	Límite Plástico
P	=	Carga
qu	=	Resistencia a la compresión simple; consistencia natural.
Ss	=	gravedad específica
t	=	tiempo
to	=	Tiempo inicial
V	=	Volumen
%w	=	contenido de agua
Ws	=	Peso de sólidos
$\gamma_m$	=	Peso específico de la muestra
$\nu$	=	Relación de Poisson
$\sigma_v$	=	Esfuerzo efectivo vertical de confinamiento
f	=	Factor de corrección (Parámetro)
$\phi$	=	Parámetro

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En Mecánica de suelos, se enfrentan dos problemas fundamentales, el primero relacionado con la resistencia de los suelos; y el segundo, con problemas de asentamiento, es decir, compresibilidad de los suelos.

De una prueba convencional de consolidación, se obtienen parámetros fundamentales para evaluar la compresibilidad de un suelo; de aquí, la importancia que reviste ésta prueba. Por tal motivo, nace la inquietud de saber si la manera convencional cómo se realiza esta prueba es correcta o no; si se deben tomar en cuenta factores que pueden alterar los resultados obtenidos. Los factores a tener en cuenta son: Remoldeo durante el labrado de la probeta; efecto de la fricción lateral existente en la interfase entre el anillo y la probeta; la expansión que se presenta al inundar la probeta; la manera de programar los incrementos de carga; y el efecto que puede tener el considerar la

presión de agua a que ésta sometida la muestra en el campo, en el momento de realizar la prueba en el laboratorio.

Esta tesis se confinará al estudio e investigación del efecto de la fricción lateral existente entre la muestra y el anillo, evaluar cuantitativamente el efecto que tiene en el valor del esfuerzo aplicado en la superficie que a causa de la fricción, se ve reducido en un cierto porcentaje cuyo valor se desea determinar con éste trabajo.

La literatura técnica referente al tópico de la presente investigación, contiene algunas referencias donde se dan valores tentativos del porcentaje de carga aplicada que es absorbido por la fricción lateral. Una lista numerada de éstas referencias aparece en la siguiente página. Se busca sustentar éste trabajo, con una investigación de laboratorio donde se puedan reportar datos más confiables.

También es objeto de éste, buscar alguna modalidad de la prueba de consolidación, donde se reduzca el efecto de la fricción lateral.

Por último, dar una serie de recomendaciones que permitan a las personas relacionadas con éste tipo de pruebas de laboratorio; realizar una prueba de consolidación, donde se puedan obtener datos más confiables.

## LISTA DE REFERENCIAS

1. Donald W. Taylor.  
Research on Consolidation of Clays.  
Massachusetts Institute of Technology.  
Agosto 1942.
2. Theodore Van Zelst.  
Proceedings of the second International Conference  
on soil Mechanics and Foundation Engineering.  
Rotterdam. 1948.  
  
" An Investigation of the factors affecting  
Laboratory consolidation of Clays"  
Pag: 52-61
3. William Lambe.  
Soil Testing For Engineers  
The Massachusetts Institute of Technology  
John Wiley & Sons. 1951  
Págs. 80 - 81
4. Leonardo Zeevaert W.  
Apuntes de Mecánica de Suelos.  
Volumen II. Tomo I. Sección III-5 Pág. 8-12  
Facultad de Ingeniería U.N.A.M. 1966.

## CAPITULO II

BREVE RESEÑA HISTORICA

Se hizo una revisión a la literatura técnica referente al tópico de éste trabajo; es decir, donde se analiza el efecto de la fricción lateral existente entre la muestra y el anillo durante una prueba de consolidación. Existen pocas referencias al respecto, las cuáles ya han sido enumeradas. Presentaré un resumen de los trabajos existentes hasta la fecha; cuyos procedimientos serán comentados en base a los criterios obtenidos de la investigación realizada en éste trabajo.

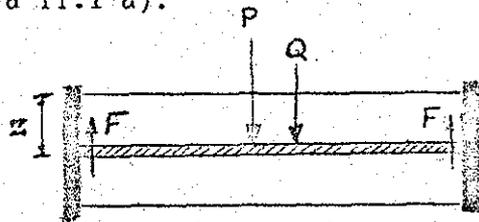
II.1 Donald W. Taylor. (1942)

Research on Consolidation of Clays.  
Massachussetts Institute of Technology.  
Agosto 1942.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El primer intento para medir cuantitativamente el valor de la fricción lateral fué hecho por W.L. Wells and J Lowe en 1935. De éste trabajo hace referencia el autor.

Siendo la  $P$  la carga intergranular actuante a una prof.  $Z$ . sin considerar la fricción lateral y siendo  $Q$  la carga intergranular real a la prof.  $Z$ .; en cualquier plano horizontal,  $Q < P$  en la cantidad de fricción lateral entre el anillo y la muestra a dicha profundidad. (ver figura II.1 a).



$Q$  = Carga intergranular real, teniendo en cuenta la fricción.

$P$  = Carga intergranular a la profundidad  $Z$ , sin tener en cuenta la fricción.

Figura II. 1. a

En la superficie superior  $Q = P$  y en la superficie inferior  $Q = P - F$ ; suponiendo que la distribución de la fricción. en el caso de un anillo fijo, sería:



Distribución de la fricción Lineal



Distribución aproximada de la fricción. constante.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

El autor parte de la hipótesis de que la distribución de la fricción es lineal; pero para efectos prácticos, asume una distribución aproximada de la fricción constante.

Siendo  $F$  el valor total de la fricción lateral para toda la altura del anillo.

El autor llega a la conclusión, basando en la distribución aproximada de la fricción como constante, que la expresión válida para obtener el factor de corrección por efecto de la fricción lateral es:

$$\underline{\bar{Q}} = P - 0.5 F \quad \text{II.1.}$$

Siendo:  $\bar{Q}$  = carga real media bajo la cuál se consolida la muestra.

$P$  = carga aplicada en la superficie de la probeta.

$F$  = valor total de la fricción obtenido de pruebas directos (F. Hiltner - 1935).

#### Método para obtener el valor de $F$ :

F. Hiltner en el año de 1935 diseñó un tipo especial de aparato de consolidación el cuál permitía la determinación directa de la fricción lateral existente entre el anillo y la probeta. Dicho aparato poseía todas las características de un aparato convencional de consolidación; la muestra en vez de estar integrada con la base, ésta soportada separadamente por un anillo que permite la medición de la fricción; por medio de correcciones continuas a la carga aplicada, cada que observaba un movimiento relativo entre el anillo y la muestra. Este movimiento relativo era registrado por medio de un extensómetro colocado en la parte inferior del anillo.

Un resumen de los datos obtenidos en una investigación hecha sobre

Arcilla de Boston está dado figura II.1. En dicha figura se representa una prueba realizada sobre mat. inalterado y 3 pruebas sobre mat. remoldeado. Estos datos se consideran límites de los valores obtenidos de la fricción total como un porcentaje de la carga total aplicada al final de la consolidación primaria. De acuerdo a la expresión II.1, el factor de corrección es  $\frac{1}{2}$  de la fricción total  $F \rightarrow F.C. = 0.5 \cdot F$

De acuerdo con la fig. II.1  $\rightarrow$  El Factor de corrección será de 6 - 11% de la carga aplicada para un mat. remoldeado y de 5 - 7% para un mat. inalterado.

De la fig. II.2. Gráficas obtenidas de la investigación hecha por Hiltner; se concluyó que la forma de las curvas no variaba mucho respecto a las obtenidas por el método convencional.

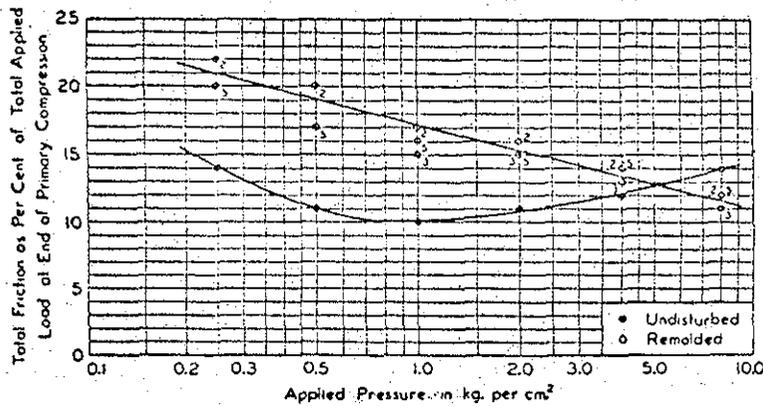


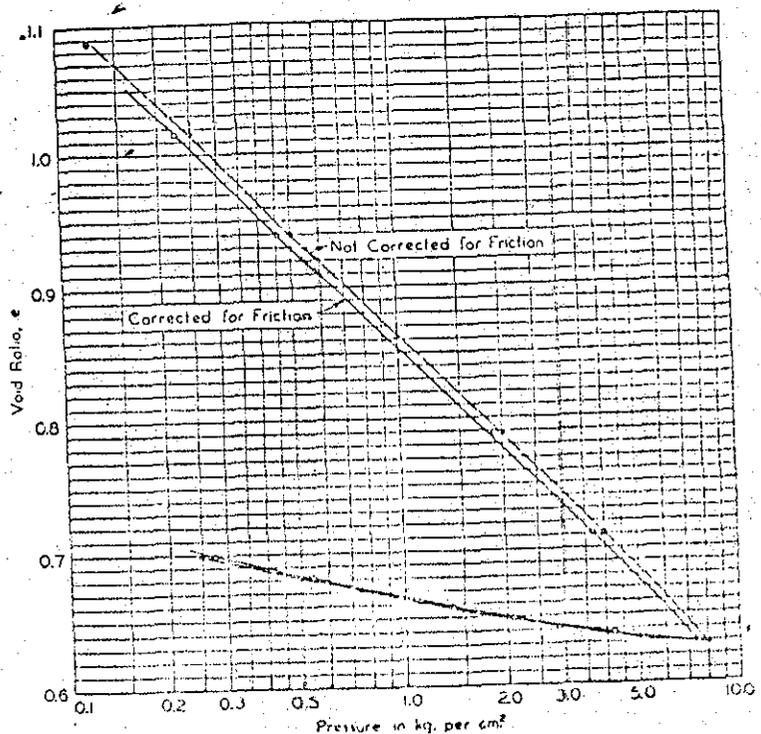
Figura II-1.

Valores de la Fricción Lateral  $F$  como % de la carga total aplicada. (Hiltner - 1935). I.T.M.

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Figura II-2.

Curvas de compresibilidad que muestran el efecto de la corrección por fricción. (Hiltner - 1935) I.T.M.



II.2 Teodore Van Zelst. (1948)

Proceedings of the second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam. 1948.

" Una investigación de los factores que afectan las pruebas de consolidación en el laboratorio".

Esta investigación se hizo con el fin de evaluar el numero de factores que influían en los resultados de las pruebas de consolidación en laboratorio. Los factores que se analizaron fueron:

- . Variación natural de la muestra.
- . Espesor de Espécimen.
- . Expansión.
- . Fricción lateral existente entre la muestra - anillo.
- . Alteraciones en la preparación de la muestra.

El inciso donde se hace referencia a la fricción; el autor hace referencia al trabajo realizado por Wells and Lowe en el año de 1935 en el Instituto Tecnológico de Massachussetts.

Resume que el valor de la fricción lateral es de un 10% de la carga aplicada. Indica cómo las curvas de compresibilidad donde el valor de los esfuerzos se corrigen por efecto de la fricción lateral yacen paralelas a las curvas obtenidas por el método convencional.

Hace mención de la ventaja existente en el empleo de anillos flotantes.

Se concluye que las variaciones entre dos pruebas de consolidación sobre muestras idénticas de suelo son mayores que las debidas al efecto neto de la fricción lateral, por esta razón, es innecesario intentar

la corrección por fricción lateral.

II.3 W. Lambe. (1951)  
Soil Testing for Engineers.  
Pag. 80 - 81.

En este trabajo, Lambe hace hincapié entre la diferencia que existe en el efecto de la fricción dependiendo del tipo de anillo empleado - flotante o fijo.

En un anillo fijo, todos los movimientos del suelo son hacia abajo con relación al anillo. El promedio de carga actuante en un plano  $Z$  es  $\bar{p} = P - HF$ .

Siendo  $P$  = carga aplicada en la parte superior.

$2H$  = altura del anillo

$F$  = fricción lateral por unidad de longitud.

En un anillo flotante, el espécimen de suelo se mueve en dos sentidos, se generan fuerzas de fricción en dos sentidos.

$$\rightarrow \bar{p} = P - \frac{HF}{2}$$

Son más pequeños los efectos de fricción en un anillo flotante que en un rígido. La fricción es función de la presión intergranular la cuál varía durante el proceso de consolidación  $\rightarrow$  la fricción es variable.

Lambe hace también mención del trabajo realizado por Wells and Lowe. (1935 - I.T.M.). Da los siguientes valores del valor de la fuerza total de fricción como un % de la carga aplicada.

- . Arcillas Remoldeadas  $\rightarrow F = 12-22\%$  carga aplicada
- . Arcillas Inalteradas  $\rightarrow F = 10-15\%$  carga aplicada

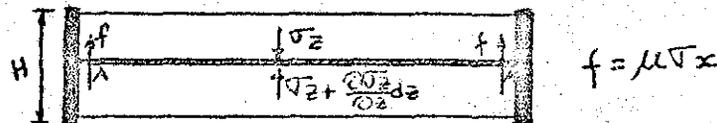
Concluye el autor de éste trabajo, que la carga aplicada se debe incrementar en un 10% para compensar el efecto de la fricción lateral en el valor real de la carga bajo la cuál se consolida la muestra.

II.4 Leonardo Zeevaert W. (1966)  
Apuntes de Mecánica de Suelos.  
Volumen II - Tomo I. Sección III.5

En la prueba de compresibilidad efectuada en el odómetro es importante corregir el esfuerzo aplicado con motivo de la fricción lateral que ocurre sobre el anillo de la prueba.

Siendo:  $\sigma_z$  = esfuerzo vertical

$\sigma_x$  = esfuerzo horizontal a una prof.  $z$



Establece que el valor de la resistencia por fricción lateral es

$f = \mu \sigma_x$  siendo:  $\mu$  = coeficiente de fricción definido según coulomb.

$\sigma_x$  = esfuerzo horizontal sobre el anillo.

Establece que la relación existente entre el esfuerzo horizontal y el esfuerzo vertical, según la teoría de la elasticidad es:

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\nu}{1-\nu} = K$$

Siendo:  $\nu$  = relación de Poisson.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

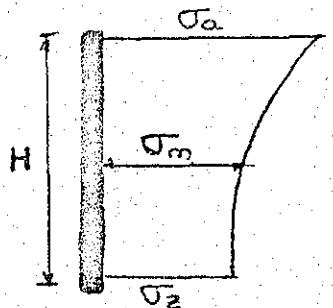
Estableciendo el equilibrio de la faja A-A y asumiendo que la diferencia entre el esfuerzo aplicado en la parte superior y en la inferior --

se debe al efecto neto de la fricción; el autor llega a la expresión.

$$\sigma_z = \sigma_a \cdot e^{-4 \frac{\mu}{D} K \cdot z} \quad \text{II.2}$$

donde establece la relación existente entre el esfuerzo aplicado en la superficie de la probeta  $\sigma_a$  y el esfuerzo real a una prof.  $z$ ,  $\sigma_z$ .

El valor medio de la presión intergranular será:


$$\sigma_m \cdot H = \int_0^H \sigma_z dz \quad \text{II.3}$$

Con II.2 y II.3, se llega a la expresión:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{1}{\varphi} \{1 - e^{-\varphi}\} \quad \text{II.4}$$

donde  $\varphi = \frac{4 \mu k}{\left(\frac{D}{H}\right)}$

La expresión II.4 nos da el factor de corrección para la carga aplicada.

El autor hace mención de pruebas experimentales que demuestran que el factor de corrección es del orden de 0.95 para valores de  $\frac{R}{H} = 4$

Concluye sobre la importancia del valor  $\frac{D}{H}$  en el valor obtenido para el factor de corrección.

Recomienda el uso de valores mayores de  $\frac{D}{H}$  para reducir el efecto de la fricción lateral.

Comentarios.

II.1 Donald W. Taylor

De acuerdo al fundamento teórico en que se basa Taylor para evaluar la importancia que tiene la fricción lateral sobre el valor del esfuerzo aplicado en la superficie de la muestra, vemos que parte de la consideración de que la distribución de la fricción a lo largo del anillo es lineal, partiendo de cero en la parte superior.

En el caso de un anillo fijo, y de acuerdo a la manera cómo se efectúa el movimiento relativo entre la muestra y el anillo, la mayor distorsión se produce en la parte superior del conjunto anillo-muestra; de donde se deduce que es allí donde se presenta la mayor fricción, llegando a la conclusión de que no es válida la distribución gráfica de la fricción, asumida por el autor. Este razonamiento tampoco es válido para un anillo de tipo flotante.

Finalmente, Taylor llega a la conclusión de que el factor de corrección para el esfuerzo aplicado es:

$$\underline{\underline{\bar{Q}}} = P_2 - 0.5 F \quad \text{II.5}$$

donde los términos ya han sido definidos.

Aceptando la aproximación de la expresión II.5; ahora queda la duda sobre la validez de los valores de F obtenidos por Hillner; en cuyo trabajo no se hace referencia alguna a las dimensiones de los anillos empleados, es decir, el autor omite por completo la importancia de la relación  $\frac{D}{H}$  en el valor obtenido de F; en éste sentido, creo que es de bastante importancia ésta omisión ya que el valor de la fricción está ligada directamente con la altura del anillo. El autor no especifica las condiciones en que se realizaron las pruebas; ni el tipo de

material empleado, ni las características del anillo en cuanto a dimensiones y material en que estaban hechos.

Esta falta de documentación hace difícil hacer una crítica a el trabajo realizado.

II.2 y II.3: Tanto el trabajo realizado por Van Zelst como el de Lambe, los autores se limitan a hacer una breve referencia al trabajo presentado por Taylor; su aportación en éste sentido es nula. Ambos concluyen que el efecto de la fricción lateral representa un 10% del valor de la carga aplicada. Ambos carecen de información sobre las condiciones generales de las pruebas (Altura del anillo, Tipo de material empleado, etc).

#### II.4 Leonardo Zeevaert W.

El autor, basado en la ley de resistencia al esfuerzo cortante formulada por Coulomb, expresa el valor de la resistencia por fricción, - como una función del coeficiente de fricción  $\mu$  en la interfase y del esfuerzo normal actuante sobre la pared del anillo.

La relación en que se basa para obtener el valor del esfuerzo normal en función del esfuerzo vertical aplicado es la formulada por la teoría en la elasticidad donde  $\frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\nu}{1-\nu}$  → relación que se ha reportado a una buena aproximación.

Su formulación para obtener la expresión del factor de corrección por efecto de la fricción lateral, parte de considerar que la diferencia entre el esfuerzo vertical aplicado en la parte superior de la faja A - A situado a una prof. Z. y el esfuerzo actuante en la parte inferior, se debe al efecto de la fricción lateral actuante en el espesor dz.

Consigna que para valores de  $\frac{R}{H} = 4$ , la fricción tiene un valor de un 5% de la carga aplicada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El autor es el primero en hacer hincapié en la importancia de la relación  $\frac{D}{H}$  en el valor que se obtiene de la fricción, recomendando valores mayores de dicha relación para reducir el efecto de la fricción lateral.

El presente trabajo tendrá el mismo enfoque que el Dr. Zeevaert le ha dado al factor de la fricción lateral; tendrá modificaciones y se busca sustentar los resultados con pruebas de laboratorio; que nos den mayor confiabilidad y nos permitan obtener recomendaciones más precisas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO III

### FUNDAMENTO TEORICO

#### III.1 Concepto Básicos:

##### III.1.A Ley de Resistencia al Esfuerzo Cortante:

La ley fenomenológica de resistencia al esfuerzo cortante fué formulada por C.A. Coulomb (1773).

La ley de Coulomb ésta expresada así:

$$S = C + \sigma_n \tan \phi \quad 1.III.1$$

es donde:  $S$  = resistencia unitaria al esfuerzo cortante

$c$  y  $\phi$  = parámetros que representan la cohesión y el ángulo de fricción interna respectivamente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$\sigma_n$  = esfuerzo normal a la superficie potencial de deslizamiento.

La interpretación simple de la ley de Coulomb puede efectuarse como sigue:

De acuerdo a la fig. III.1.A. (a) pag. 28; un block sin peso apoyado sobre una superficie plana y sobre la cuál actúa una carga P. si el block se somete a una fuerza horizontal F, aumentándola hasta hacer deslizar el block, se encontrará que la fuerza F necesaria para mover la fricción entre éste y el plano de apoyo será:

$$F = P \tan \phi., \quad 2-III.1$$

la cuál representa la resistencia al esfuerzo friccionante entre las dos superficies. El valor de  $\tan \phi$  es el coeficiente de fricción - definido por Coulomb entre las superficies que deslizan en el momento incipiente de la falla  $\rightarrow \mu = \tan \phi$ .

Sin embargo, inmediatamente que se vence la fricción estática el block entra en movimiento con una fuerza horizontal menor, de tal manera que en movimiento, la fricción entre las superficies es menor. A ésta - fricción se le da el nombre de fricción dinámica o residual.

La resistencia a la fricción es independiente del área de contacto, ya que se divide la expresión 2-III.1 entre el área total de contacto A, se tendrá dicha ley en función de los esfuerzos unitarios medios; esto es:

$$S = \sigma_n \tan \phi \quad 3-III-1$$

S = resistencia unitaria al esfuerzo cortante.  
 $\sigma_n$  = esfuerzo normal a la superficie potencial de deslizamiento.

El efecto de la cohesión puede interpretarse por medio de la figura (b) III.1.A Pag. 28, en donde el block ha sido pegado a la superficie con un pegamento cuya resistencia depende de la presión normal ejercida sobre el block mientras el pegamento seca. En éstas circunstancias y haciendo  $P = 0$ , se aplica la fuerza horizontal hasta romper por cizalleo al pegamento que liga el block a la superficie. Entonces la resistencia en éste caso valdrá:

$$S = C \quad 4.III.1$$

Al valor de "C" se denomina cohesión y dependerá de la calidad del pegamento.

Inmediatamente después que se vence la resistencia debida a la cohesión, es decir, cuando se ha roto por cizalleo el pegamento; la resistencia es nula.

Ahora bien, si se dispone el block con fricción en la superficie de contacto, como muestra la fig. (c). III.1.A. donde el block se ha pegado a la superficie con pegamento; se verá que la fuerza necesaria para hacer fallar el sistema al esfuerzo cortante será:

$$S = C + \sigma \tan \phi \quad 5.III.1$$

Ya que al deslizar el block, las dos resistencias tendrán que rebasarse al mismo tiempo.

De la expresión 5-III-1; se ve que los parámetros  $c$  y  $\phi$  tienen la siguiente interpretación:

$C$  = depende del mat. cohesivo en particular.

$\phi$  = Función de las propiedades de los materiales en contacto, de su rugosidad y lubricación

Es muy importante hacer notar, que en el caso correspondiente a la fig. (c). III.1.A. Al inicio, para poder poner en movimiento el block, será necesaria una fuerza horizontal  $S$  que venza tanto la fricción estática, (la cuál dependerá del peso del block  $P$ ; como de los irregularidades de la superficie de contacto), como también, la resistencia debida a la cohesión; para lo cuál será necesario romper por cizalleo el pegamento. Una vez que el block entra en movimiento, la fuerza horizontal necesaria en este nuevo estado será menor, y será de una magnitud tal que se venza la resistencia a la fricción dinámica o residual. Es decir, una vez que el block éste en movimiento, ya no influye la cohesión existente entre las superficies de contacto, pues para poder tener éste estado cinemático dicha cohesión tuvo que romperse. En este nuevo estado, sólo tendremos la resistencia residual ó dinámica, la cuál se vence con una fuerza horizontal menor a la inicial. (ver figura d. III.1.A. pag. 29 ). En una prueba de consolidación; en la interfase suelo-anillo, la adherencia se rompe al efectuarse el desplazamiento relativo entre la muestra y el anillo, después de alcanzar la máxima adherencia; en ésta nueva condición física, ya no hay que tener en cuenta la adherencia que existe en la interfase. Si no se rompe dicha adherencia, no habría consolidación pues no daría lugar al movimiento relativo presente durante el proceso de consolidación. De acuerdo a lo anterior, sólo debemos tener en cuenta la fricción residual debida al rozamiento en la interfase suelo-anillo.

Durante el proceso de consolidación existe un movimiento relativo en la interfase suelo- anillo, dicho movimiento es mayor de lo que se puede formar la membrana delgada de material remoldeado, lo cuál trae como consecuencia el rompimiento de la adherencia existente en la interfase suelo-anillo.

### III.2 Fundamento Teórico

En la prueba de consolidación efectuada en el odómetro, se debe corregir el esfuerzo aplicado por el efecto de la fricción lateral que existe en

la interfase muestra - anillo.

Si consideramos una probeta sometida a una prueba de compresibilidad en el odómetro:

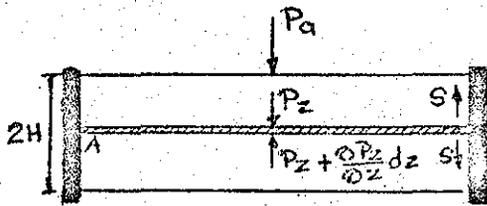
Sea: P: Carga vertical aplicada en la cara superior de la probeta

①  $P_z$ : Carga vertical actuante en el plano z.z. Parte superior faja A-A.

②  $P_z + \frac{\partial P_z}{\partial z} dz$  = Carga vertical actuante en la parte inferior de la faja A-A

$S = \sigma_n \tan \phi =$  Resistencia por fricción en la interfase.

Consideramos un Anillo Flotante, tenemos:



La diferencia entre las cargas ① y ② se debe a la fricción lateral, la cuál absorve parte de la carga aplicada. De acuerdo a lo anterior, debemos corregir la carga incrementándola en el valor que se pierde por fricción.

Analizando el equilibrio de la faja A-A tenemos:

$$P_z - (P_z + \frac{\partial P_z}{\partial z} dz) = 2\pi r \tan \phi \sigma_n dz$$

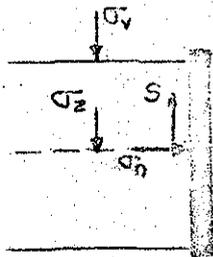
$$\frac{\partial P_z}{\partial z} = 2\pi r \tan \phi \sigma_n$$

1.III.2

La expresión 1.III.2 nos indica cuál es la variación de la carga P con la profundidad, debida al efecto de la fricción.

III.2.a: Determinación del Esfuerzo Normal

Si observamos macroscópicamente el contacto entre la muestra y el anillo, vemos que se trata de un suelo remoldeado por el efecto del labrado de la probeta.



$$S = \sigma_n \tan \phi$$

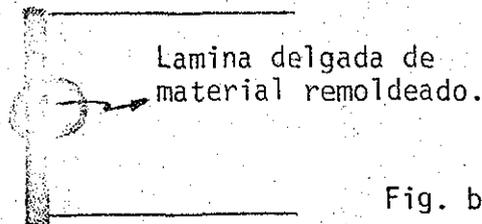


Fig. b-III.2

Analizamos los desplazamientos de la zona marcada con el círculo fig. b-III.2, tenemos:

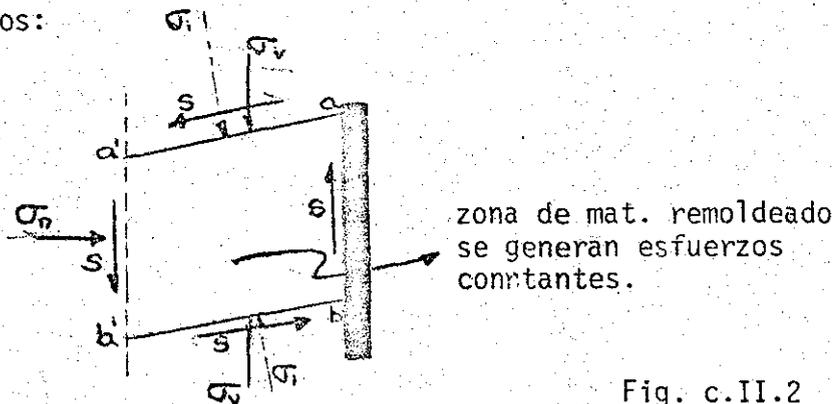


Fig. c.II.2

Para encontrar la relación entre el  $\sigma_v$  y  $\sigma_n$ , emplearemos el concepto de Mohr- Coulomb, por medio del círculo de falla (ver sección III.2.d) Pag. 25.

De acuerdo a la Teoría de Mohr- Coulomb, la relación entre el esfuerzo horizontal y el esfuerzo vertical, viene dado por la expresión:

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_z} = \frac{1 - \text{Sen}^2 \phi}{1 + \text{Sen}^2 \phi} = \frac{1}{N\phi}$$

2-III.2

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$\text{Donde } N\phi_r = \text{Número de Flujo} = \frac{1 + \text{Sen}^2 \phi_r}{1 - \text{Sen}^2 \phi_r}$$

La expresión 2.III.2 es válida cuando se trata de esfuerzos que son los principales; por lo tanto, y de acuerdo con la figura c-III.2 vemos que el esfuerzo normal a la pared del anillo, no es un esfuerzo principal, por lo que invalida la expresión 2-III.2 para relacionar los esfuerzos horizontales y verticales.

Es muy importante hacer notar, que el valor del ángulo de fricción en la interfase muestra-anillo  $\phi_i$ , es menor que el ángulo de fricción interna para un material remoldeado  $\phi_r$ ; es decir  $\phi_i < \phi_r$ . Acá tenemos un obstáculo que nos impide emplear la expresión 2-III.2. puesto que en la interfase, se moviliza el esfuerzo cortante para un  $\phi_i < \phi_r$ . (Ver tabla IV-3) pág. 41 La expresión 2.III.2 es válida para casos en que el esfuerzo cortante se moviliza para valores del ángulo de fricción mayores o iguales a  $\phi_r$ .

Jaky propone una expresión para la relación entre los esfuerzos horizontales a vertical, expresado así:

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = 1 - \text{Sen} \phi_r. \quad 3.III.2$$

La expresión anterior está formulada para valores de  $\phi_i < \phi_r$ . (en la interfase existe un mat. remoldeado, que aunado a una grasa de silikón, hace que el valor del ángulo de fricción, en la interfase muestra-anillo  $\rightarrow \phi_i$  sea < que el  $\phi_r \rightarrow$  ángulo de fricción interna de un mat. remoldeado). De lo anterior se deduce que solamente existe deslizamiento entre el suelo alrededor del anillo y el anillo.

$$\text{De } 3\text{-III.2 } \rightarrow \quad \sigma_h = (1 - \text{Sen} \phi_r) \sigma_v \quad 4\text{-III.2}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Reemplazando la 4-III.2 en 1-III.2, Tenemos:

$$\frac{\partial P_z}{\partial z} = -2\pi r \tan \phi i (1 - \text{Sen } \phi r) \sigma_v \quad 5\text{-III.2}$$

Primera hipótesis:  $P_z = A \sigma_z$

$$\pi r^2 \times \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 2\pi r \tan \phi i (1 - \text{Sen } \phi r) \sigma_v$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = -\frac{2}{R} \tan \phi i (1 - \text{Sen } \phi r) \sigma_v \quad 6\text{-III.2}$$

Sea  $K = (1 - \text{Sen } \phi r) \tan \phi i$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = dz = -\frac{2}{R} K \phi \sigma_z dz$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\sigma_z} = -\frac{2}{R} K \phi dz \quad 7\text{-III.2}$$

Integrando, Tenemos:

$$\text{Ln } \sigma_z = -\frac{2}{R} K \phi dz + C \quad 8\text{-III.2}$$

Para  $z = 0 \rightarrow \sigma_z = \sigma_a \rightarrow C = \text{Ln } \sigma_a$

En 8-III.2. Tenemos:  $\text{Ln } \frac{\sigma_z}{\sigma_a} = -\frac{2}{R} K \phi \cdot z$

$$\sigma_z = \sigma_a e^{-\frac{2}{R} K \phi z} \quad 9\text{-III.2}$$

La expresión 9-III.2 nos representa la variación del esfuerzo  $\sigma_z$  con la profundidad, debido al efecto de la fricción.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

donde:

$\sigma_a =$  Esfuerzo aplicado en la superficie de la probeta.

$R =$  Radio de la probeta.

$K\phi = \text{Tan } \phi_i \cdot (1 - \text{Sen } \phi_r)$

Vemos la necesidad de determinar el valor del ángulo de fricción interna para un material remoldeado  $\phi_r$  y el ángulo de fricción en la interfase suelo-anillo.

III-2.b: Determinación del factor de corrección:

Quando se emplean anillos fijos, el efecto de la fricción es mayor que cuando se emplean anillos flotantes.

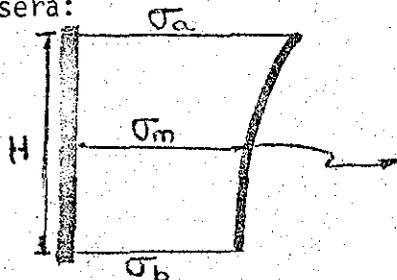
Consideramos los anillos flotantes que son los que más se emplean.



Un anillo flotante drena por ambas caras, el movimiento de la muestra se realiza en dos direcciones.

Espesor anillo =  $2H$

La variación de esfuerzos en la muestra por efecto de la fricción, será:



Variación de esfuerzos en la muestra por la fricción.

Figura d-III.2

De 9.III.2  $\rightarrow \sigma_z = \sigma_a \times e^{-\frac{2}{R} K\phi z}$

De figura d-III.2  $\rightarrow \sigma_m = \frac{1}{H} \times \int_0^H \sigma_z dz$

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

10-III.2

Integrando  $\sigma_m = \frac{R}{2K\phi H} \left\{ 1 - e^{-\frac{2}{R} K\phi H} \right\} \sigma_a$  11.III.2

Sea  $\ell = \frac{2 K\phi H}{R} = \frac{4 K\phi H}{D}$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{1}{\ell} \left\{ 1 - e^{-\ell} \right\} = f \quad 12.III.2$$

$$\sigma_m = f \sigma_a \quad 13.III.2$$

La expresión 13.III.2 nos da el factor de corrección por el cuál debo multiplicar el esfuerzo  $\sigma_a$  aplicado en la superficie de la probeta, para obtener el esfuerzo  $\sigma_m$ , que sería el valor del esfuerzo real medio al que se ésta consolidando la muestra.

- El factor de corrección será:

$$f = \frac{1}{\ell} \left\{ 1 - e^{-\ell} \right\} \quad 14.III.2$$

donde:  $\ell = \frac{2K\phi H}{R} = 2K\phi \left( \frac{2H}{D} \right)$

$K\phi = (1 - \text{Sen } \phi r) \tan \phi i$

$2H =$  altura de anillo

$R =$  radio del anillo

De acuerdo con las hipótesis hechas para este trabajo,  $f$  es función de las dimensiones del anillo, del ángulo de fricción en la interfase  $\phi i$ . Parámetros a determinar en el laboratorio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

III.2.C: Influencia de la cohesión existente en la Interfase.

De acuerdo a los conceptos expuestos en la sección III.1. vemos que en el momento en que empieza el desplazamiento relativo entre la muestra y el anillo, se ha rebasado tanto la resistencia estática como también la resistencia debida a la cohesión, quedando presente la resistencia residual.

Durante el proceso de consolidación, existe un movimiento relativo entre la muestra y el anillo; en éstas condiciones, sólo se tendrá en cuenta la resistencia debida a la fricción residual. La cohesión ó adherencia existente en la interfase suelo-anillo; no tendrá influencia, pues para poder iniciarse el movimiento, tuvo que romperse dicha adhesión por cizalleo. Si no se rompe dicha adherencia, no habría consolidación, pues ésta no daría lugar al movimiento relativo que ésta presente durante una prueba de consolidación. Por lo anterior, la adherencia que se presenta en la interfase suelo-anillo no se tendrá en cuenta para el análisis del efecto de la fricción lateral. Sólo nos interesa entonces la fricción residual que es debida al rozamiento en la interfase suelo-anillo.

III.2.d: Círculo de falla de Morh - Coulomb.

El estado de esfuerzos principales en un punto  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  puede ser representado por el círculo de Morh.

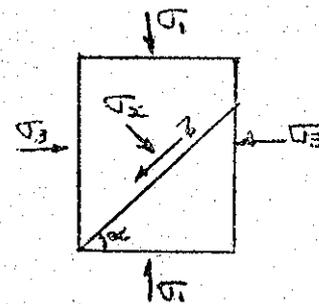
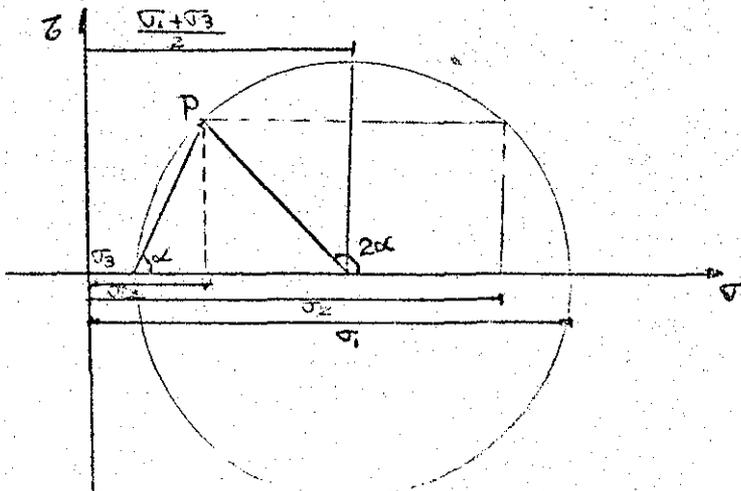


Fig. e-III.2

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Si  $\sigma_1$  representa el esfuerzo principal mayor y  $\sigma_3$  el esfuerzo principal menor, y así también  $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$  son los esfuerzos normales correspondientes, entonces, para esfuerzo o deformación plana se puede escribir:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} (\cos 180^\circ - 2\alpha) \\ \sigma_z &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \text{ Sen } 2\alpha \end{aligned} \quad 16.III.2$$

En donde  $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2}$ , representa la posición del centro del círculo de esfuerzos sobre el eje de  $\sigma$ . y  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$  el radio de círculo, que es a la vez una medida del esfuerzo cortante  $\tau$ . El ángulo  $\alpha$  representa la inclinación del plano donde se encuentran aplicados los esfuerzos  $\sigma_x$  y  $\tau$ .

En caso de una muestra remoldeada, la ley de resistencia se expresa:

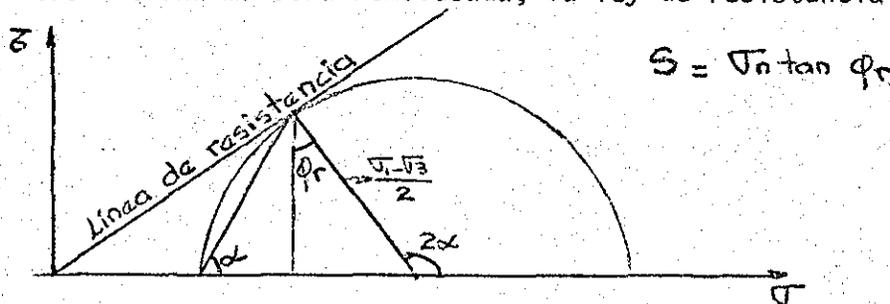


Fig. f-III.2

De acuerdo a la Teoría de Mohr-Coulomb  $\rightarrow$ .

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_z} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha}{(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha} \quad 17.III.2$$

Pero  $2\alpha = \phi_r + \frac{\pi}{2}$        $\cos 2\alpha = \text{Sen } \phi_r$

Además  $\text{Sen } \phi_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$

$$\text{De donde } = \frac{\sigma_n}{\sigma_z} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ Sen } \phi_r}{(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ Sen } \phi_r} = \frac{1 - \text{Sen}^2 \phi_r}{1 + \text{Sen}^2 \phi_r}$$

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_z} = \frac{1 - \text{Sen}^2 \phi_r}{1 + \text{Sen}^2 \phi_r} = \frac{1}{N_{\phi r}}$$

18.III.2

---

---

Donde  $N_{\phi r} = \frac{1 - \text{Sen}^2 \phi_r}{1 + \text{Sen}^2 \phi_r} = \text{Número de Flujo}$

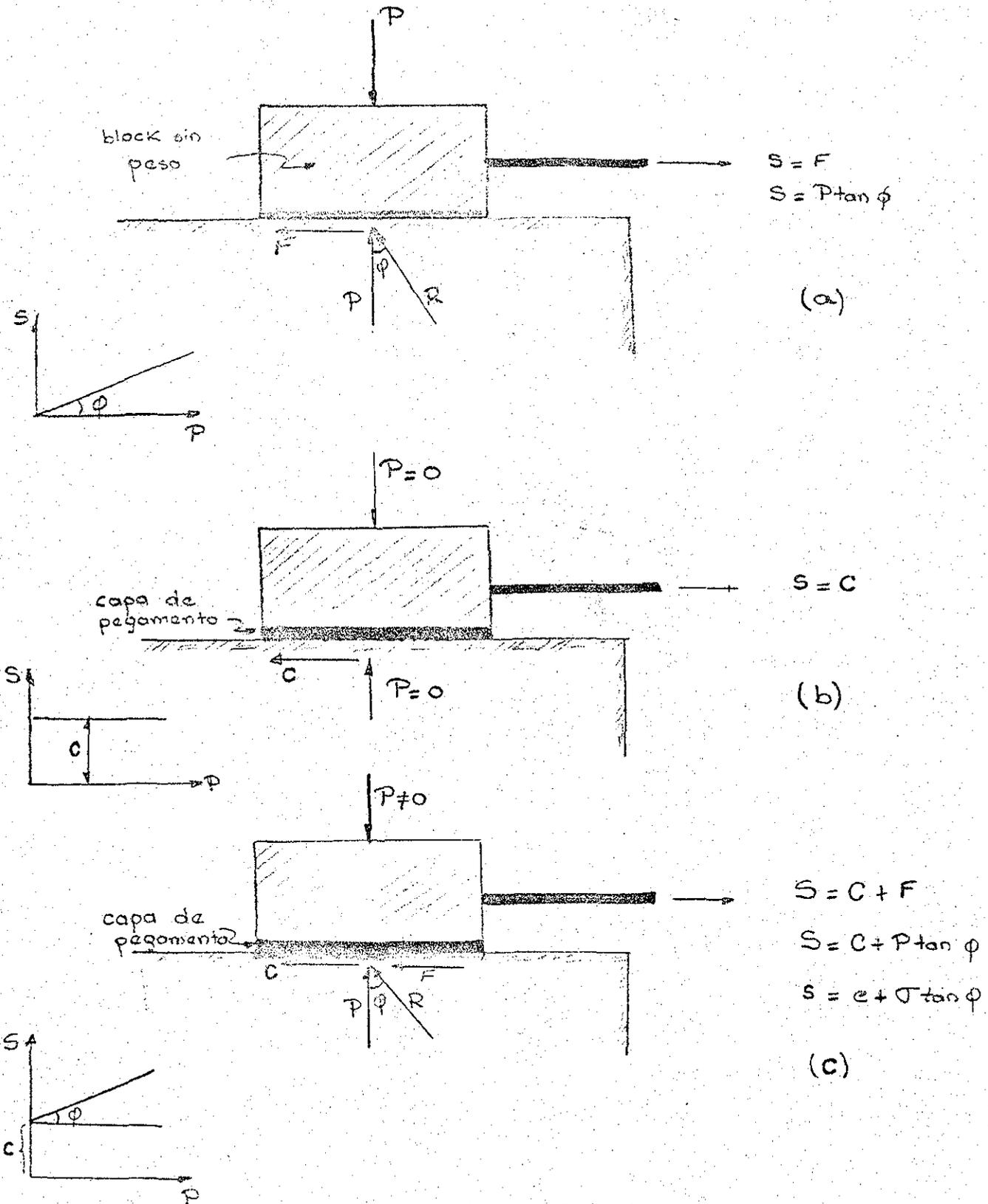


Fig. III-1.A

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

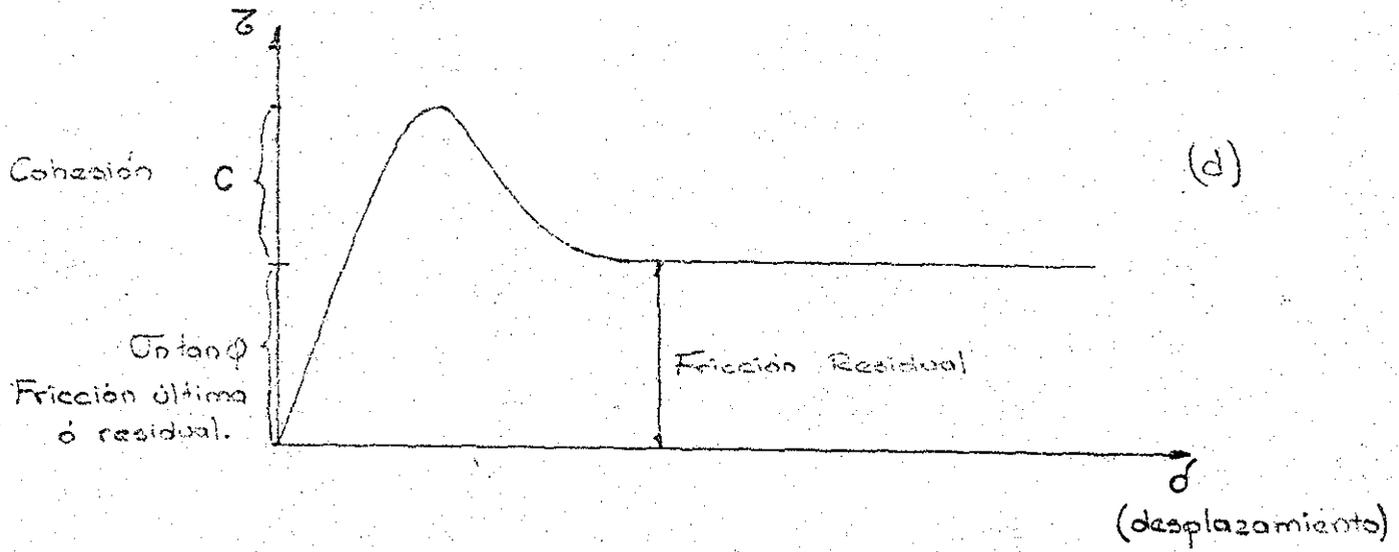


Fig. III-1.A

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO IV

INVESTIGACION DE LABORATORIO.

En ésta investigación, la evaluación de los parámetros  $\phi_i$ ,  $\phi_r$ , se hará mediante pruebas de corte directo. De acuerdo con el capítulo anterior, se efectuarán pruebas con material remoldeado tanto para la determinación del  $\phi_r$ ; como la de los ángulos de fricción en la interfase  $\phi_i$ , que se obtendrán de pruebas realizadas también en el aparato de corte directo, sólo que tendrá otras modalidades

IV.1 Aparato de Corte Directo.

Ver figura (IV.I. ) Pag. 38.

El aparato de corte directo fué creado con el objeto de determinar la ley de resistencia al esfuerzo cortante de un material. De una prueba efectuada en dicho aparato, se podrán obtener el valor de los parámetros  $C$  (cohesión) y  $\phi$  (ángulo de fricción interna).

El aparato consiste en: una caja inferior sujeta a una base firme, donde se coloca una piedra porosa para permitir el drenado de la probeta. Un marco superior móvil el cual va ligado por un cable a una polea, en el extremo del cable se coloca la carga deseada para aplicar la fuerza horizontal  $F$  a la probeta.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## IV-2 Procedimiento

El procedimiento para efectuar la prueba es:

### IV-2.a Labrado de la probeta:

En este caso, se trabajó con material remoldeado. Para preparar una muestra lo más homogénea posible de material remoldeado, un volumen suficiente de material para la prueba, se introduce en dos bolsas plásticas cuidando que éstas estén en buen estado; y se procede a amasar el material con las manos, tratando de que no haya pérdidas en el contenido de agua. El amasamiento termina cuando la muestra de material remoldeada se siente homogénea al tacto, con ausencia de grumos.

Para preparar la probeta, tomamos el anillo correspondiente para las pruebas de corte, lo colocamos encima de un vidrio de dimensiones ligeramente mayores a las del anillo y procedemos a rellenar el volumen del anillo con material remoldeado. Este proceso se hizo manualmente, pues de ésta manera era más fácil detectar alguna heterogeneidad en el material. La parte superior se engrasa cuidadosamente con una espátula.

### IV-2.b Montaje de la prueba:

Teniendo listo el anillo conteniendo la probeta con material remoldeado se coloca en la caja. La caja está formada por el marco inferior el -- cuál va fijo a la base del aparato, y por el marco superior unido al inferior por medio de tornillos que después se pueden quitar en el momento de realizar la prueba.

El aparato está provisto de dos extensómetros: uno horizontal para medir la distorsión de la probeta y el otro vertical para medir las compresiones de la probeta al aplicarle una carga normal, bajo la cuál se permitirá la consolidación de la probeta; con el fin de garantizar la elimina-

ción del exceso de presión de poro provocado al aplicar el  $\sigma_n$ , se llevarán registros de  $\delta$  vs  $t$ . (curvas de consolidación) para cada incremento de carga.

Se efectuaron pruebas del tipo consolidada-lenta, puesto que el máximo valor de la fricción se obtiene cuando todo el esfuerzo aplicado  $\sigma_n$  se convierte en esfuerzo efectivo. Con éste fin, para cada incremento de cargas en el Portapesas de carga normal, se llevaron los registros  $\delta$  vs.  $\log t$ ; y se graficaron las respectivas curvas de consolidación (ver hojas de trabajo-registro de observaciones de la laboratorio-apéndice C).

#### IV-2.c Realización de la prueba:

La prueba se realiza en dos etapas:

La primera se consiste en lograr la consolidación de la probeta bajo un  $\sigma_{n1}$ . Este esfuerzo normal determinado con anterioridad se logra con varios incrementos, pues al trabajar con muestras remoldeadas, la tolerancia a la carga es menor.

La carga se coloca en el portapesas de  $\sigma_n$ , el cuál se transmite por la placa rígida sobre la probeta, causando en ésta un esfuerzo normal uniforme  $\sigma_{n1}$ , las deformaciones por éste concepto se miden en el extensómetro vertical. Se lleva un registro de  $\delta$  vs.  $t$ . (curva de consolidación). Una vez que el material ya no se deforma verticalmente, es decir, se ha eliminado el exceso de presión de poro, procedemos a efectuar la segunda etapa de la prueba.

Esta segunda etapa, consiste en aplicar la carga horizontal lentamente adicionando pesas en el extremo del cable hasta que se origine la falla de la probeta en el plano (a-a).

Obtenemos así un valor  $S_1 = \frac{F_1}{A_p}$ .

Los valores obtenidos de  $\sigma_n$  y  $S_1$  se grafican por medio de un punto en un plano de coordenadas  $S$  vs.  $\sigma_n$ . Es decir, en el eje vertical las resistencias obtenidas y en el horizontal los esfuerzos normales aplicados a la probeta. (Ver. Figuras Pag. 42, 43 y 44)

Después de hacer fallar el material, se instala otra probeta idéntica y se repite la operación con un  $\sigma_{n2}$  de mayor magnitud (Dicho  $\sigma_n$  se logra con varios incrementos en el porta-cargas de  $\sigma_v$ ). Con ésto, se logra otra  $S_2$ . Tenemos una nueva pareja de valores  $\sigma_{n2}, S_2$ . Otro punto en la gráfica.

En la misma forma, pero con nuevas probetas idénticas se obtienen tantos valores de  $(S, \sigma_n)$  como probetas se sometan a la prueba.

Los puntos representativos de cada una de éstas pruebas en la gráfica  $S$  vs  $\sigma_n$ , se localizan aproximadamente en una línea recta. La pendiente de la recta nos dará el valor de  $\tan \phi$ ; y la ordenada al origen será el valor de  $C'$ .

Siendo  $\phi$  = ángulo de fricción interna del material

$C'$  = cohesión o resistencia obtenida para su esfuerzo normal nulo.

(Ver Gráfica pag 42, 43 y 44).

Nota:

Dado que  $\phi$  debe representar el ángulo real de fricción interna del material, en éste caso hablaremos de un  $\phi_r$  ángulo de fricción interna de un material remoldeado y de  $\phi_i \Rightarrow$  ángulo de fricción de la interfase. (Modalidad explicada en el siguiente inciso), debemos garantizar que los  $\sigma_n$  represente el esfuerzo intergranular. Para éste efecto es fundamental al llevar el registro de  $\delta v_s.t$  y graficar las curvas de consolidación correspondientes, con el fin de tener la seguridad de que el esfuerzo aplicado se transmite íntegramente a la estructura granular del suelo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

→ en la prueba se debe garantizar la  $U = 0$ . ( $U =$  presión de poro).  
(ver registros y curvas de consolidación -Apéndice C pag. 62 )

#### IV-3. Modalidades de la prueba:

##### IV-3.a Obtención de $\phi_r$ :

De acuerdo al Fundamento Teórico expuesto en el capítulo IV, vemos que para obtener el valor del factor de corrección por fricción lateral; es necesario determinar los valores de los parámetros  $\phi_i$ ,  $\phi_r$ .

El ángulo de fricción interna  $\phi_r$  de un material remoldeado se obtiene siguiendo el procedimiento expuesto en los incisos anteriores. Se trabajó con una Arcilla Verde Olivo del Valle de México. Sus propiedades índices aparecen en la tabla IV.1. pag. 40. Se elaboraron 4 probetas lo más idénticas posibles de material remoldeado. Cada una de ellas se probó a un  $\sigma_n \rightarrow \sigma_n = (0.382; 0.827; 1.252; 1.554 \text{ kg/cm}^2)$ , con el fin de obtener 4 puntos en la gráfica  $S$  vs  $\sigma_n$ . y así determinar el valor de  $\phi_r$ .

Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica IV.a. Pag. 42

##### IV-3.b Obtención de $\phi_i$ .

Para obtener los valores de  $\phi_i$ , c'(Ángulo de fricción en la interfase y la adherencia en la interfase respectivamente), se empleó también el aparato de corte directo.

El  $\phi_i$  se obtiene de la resistencia que presenta el material en condiciones remoldeadas, en la zona en que éste está en contacto con el anillo donde se realizan las pruebas de consolidación.

Para obtener el valor de éste parámetro, se usaron los aparatos de corte convencionales, sólo que el volumen del anillo correspondiente al marco

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

inferior se cubría perfectamente con un volumen igual que presentara en la parte superior una superficie lisa, de idéntica área que la del anillo y de un metal igual al que se emplea en la elaboración de anillos de consolidación. La parte del anillo correspondiente al marco superior se llenaba de material remoldeado, de tal manera que en el plano a-a (ver figura IV-2 pag.38 ) se reproduce la zona correspondiente a la interfase entre el anillo y la probeta de suelo.

Con el fin de garantizar que los parámetros obtenidos de la prueba  $\phi_i$ , fuera el real, se debe asegurar la separación de el marco superior y del inferior; para lo cuál en el momento de realizar la segunda etapa, se deben operar unos tornillos auxiliares que tiene el aparato con éste fin, el de separar ambos marcos, permitiendo la medición de la resistencia en la interfase suelo - anillo.

#### IV.-3 C Obtención de $\phi_i$ , $c'$ , empleando grasa de Silikón.

Está prueba se realizó con el fin de obtener valores de  $\phi_i$  en la interfase, sólo que empleando un repelente al agua y al suelo, que provocara una reducción en los valores obtenidos de éstos parámetros en igualdad de condiciones, sólo que sin el empleo de éste lubricante.

Con éste fin, se hicieron pruebas paralelas, usando en el marco inferior una superficie de el mismo metal, una prueba se realizó sin grasa repelente y otra con grasa; con el fin de poder comparar los resultados obtenidos.

En las pruebas realizadas con grasa repelente; se cubría la superficie correspondiente al área del anillo del marco inferior, (superficie de diferente metal) con grasa repelente, y se procedía a realizar la prueba de la manera ya expuesta.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

IV-4. Programación de las Pruebas:

IV-4.a Material Empleado

Las pruebas se realizaron todas con una arcilla verde olivo proveniente del Valle de México, a la cuál se le determinó sus propiedades índices:

- . Contenido de agua ( $\omega\%$ )
- . Grado de Saturación ( $\%S$ )
- . Relación de Vacíos ( $e$ )
- . Gravedad específica ( $S_s$ )
- . Peso específico ( $\gamma_m$ )
- . Límites de consistencia(L.L;L.P)
- . Consistencia Natural ( $q_u$ )

Estos ensayos se realizaron en laboratorio, siguiendo las instrucciones dadas en el Instructivo de Prácticas de Mecánica de Suelos (1975).  
D.E.P.F.I.

Los resultados obtenidos, se consignan en la tabla IV.1. Pag. 40

4-IV.b Clasificación de las Pruebas.

Se realizaron siete pruebas, cada una de ellas se obtuvo cuatro puntos en la gráfica de  $S$  vs.  $\sigma_n$ , es decir, se probaron cuatro probetas de material remoldeado en cada prueba, para un total de 28 probetas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las pruebas se clasificarón según el metal en que se cubría el volumen del anillo inferior → metal que presentaba la superficie del marco inferior.

Se emplearon dos tipos de lubricantes, clasificadas así:

Tipo A: Grasa de Silikón

Ref: Siligal Grasa 511 M Siligal S.A.

Tipo B: Grasa de Silikón

Holtz - silixon 100

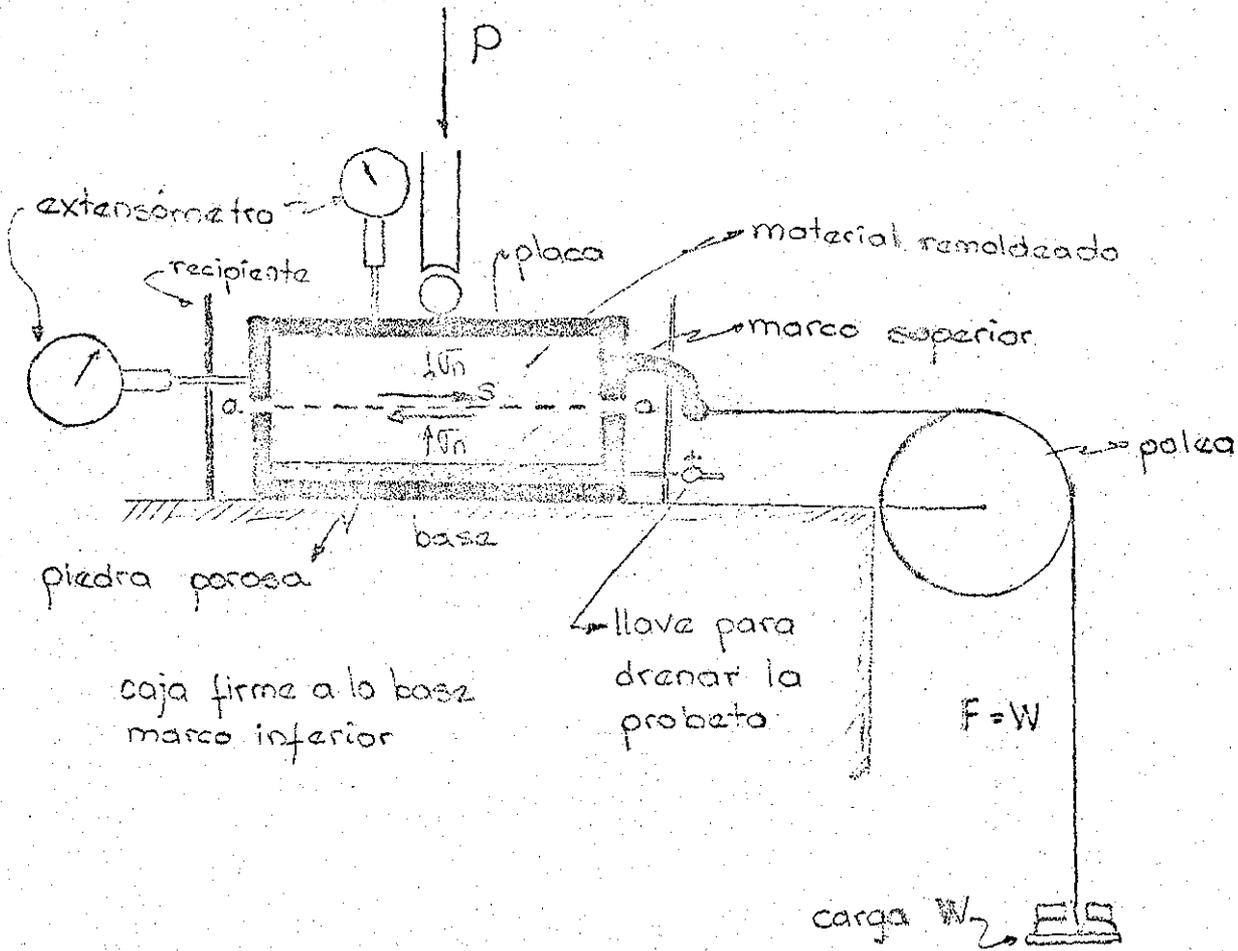
Holtz - chemical

La clasificación de las pruebas aparece en la tabla IV-2 Pag.41

IV-4c. Resultados obtenidos.

Se consignan en la Tabla IV-3, y en las gráficas IV- a, b, c.  
(págs: 41, 42, 43, 44).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

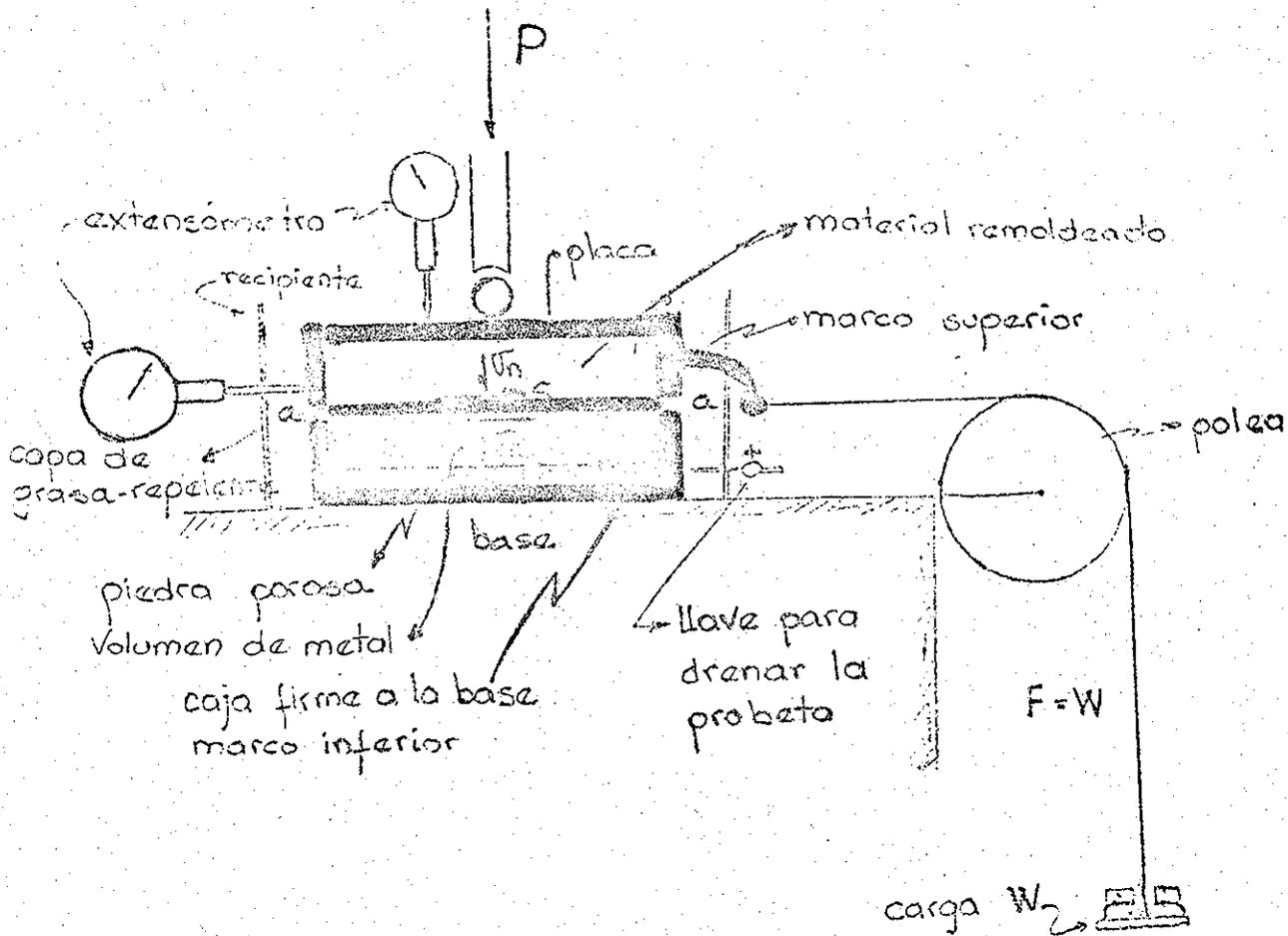


APARATO DEL CORTE DIRECTO

Prueba A - obtención del  $\phi_r$  (Plano de falla por la muestra)

Figura IV-1

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



APARATO DEL CORTE DIRECTO  
Variación para la obtención del  $\phi$  (Pruebas B-C-D-E-F-G )

Figura IV-2

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TABLA IV-1

Propiedades Indices del Material Empleado:			
Contenido de agua.	%w	=	283.26 %
Grado de Saturación.	% S	=	98. %
Relación de Vacíos	e	=	6.87
Gravedad Específica	Ss	=	2.375
Peso Específico	$\gamma_m$	=	1.148 ton/m <sup>3</sup>
Consistencia Natural	qu	=	0.8 kg/cm <sup>2</sup>
Límite Líquido	LL	=	298.60 %
Límite Plástico	L.P.	=	91.84 %
Índice de Plasticidad	I.P.	=	206.76 %

TABLA IV-2		
Prueba	Modalidad	Parámetro obtenido
A	Material Remoldeado	$\phi_r$
B	Teflón vs. Material Remoldeado	$\phi_i, C$
C	Latón vs. Material Remoldeado	$\phi_i, C$
D	Latón + Grasa Tipo A vs. Material Remoldeado	$\phi_i, C$
E	Acero Inoxid + Grasa Tipo A vs. Material Remoldeado	$\phi_i, C$
F	Teflón + Grasa Tipo A vs. Material Remoldeado	$\phi_i, C$
G	Latón + Grasa Tipo B vs. Material Remoldeado	$\phi_i, C$

TABLA IV-3			
Resultados obtenidos.			
Prueba	Modalidad	$\phi$	C (Kg/cm <sup>2</sup> )
A	Material Remoldeado	$\phi_r=28.81^\circ$	$C \approx 0$
B	Teflón vs. Material Remoldeado	$\phi_i=10.76^\circ$	C= 0.26
C	Latón vs. Material Remoldeado	$\phi_i=13.50^\circ$	C= 0.18
D	Latón + Grasa Tipo A vs. Material Remoldeado	$\phi_i= 6.28^\circ$	C= 0.13
E	Acero Inoxidable + Grasa Tipo A vs. Material Remoldeado	$\phi_i= 9.65^\circ$	C= 0.195
F	Teflón + Grasa Tipo A vs. Material Remoldeado	$\phi_i= 7.41^\circ$	C= 0.16
G	Latón + Grasa Tipo B vs. Material Remoldeado	$\phi_i= 6.52^\circ$	C= 0.14

Prueba A

Obtención del  $\phi_r$   
 (ángulo de fricción interna - mat. remoldado)

Probeta	$\sigma_1$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_3$ kg/cm <sup>2</sup>
A-1	0.382	0.382
A-2	0.827	0.413
A-3	1.252	0.565
A-4	1.584	0.882

42

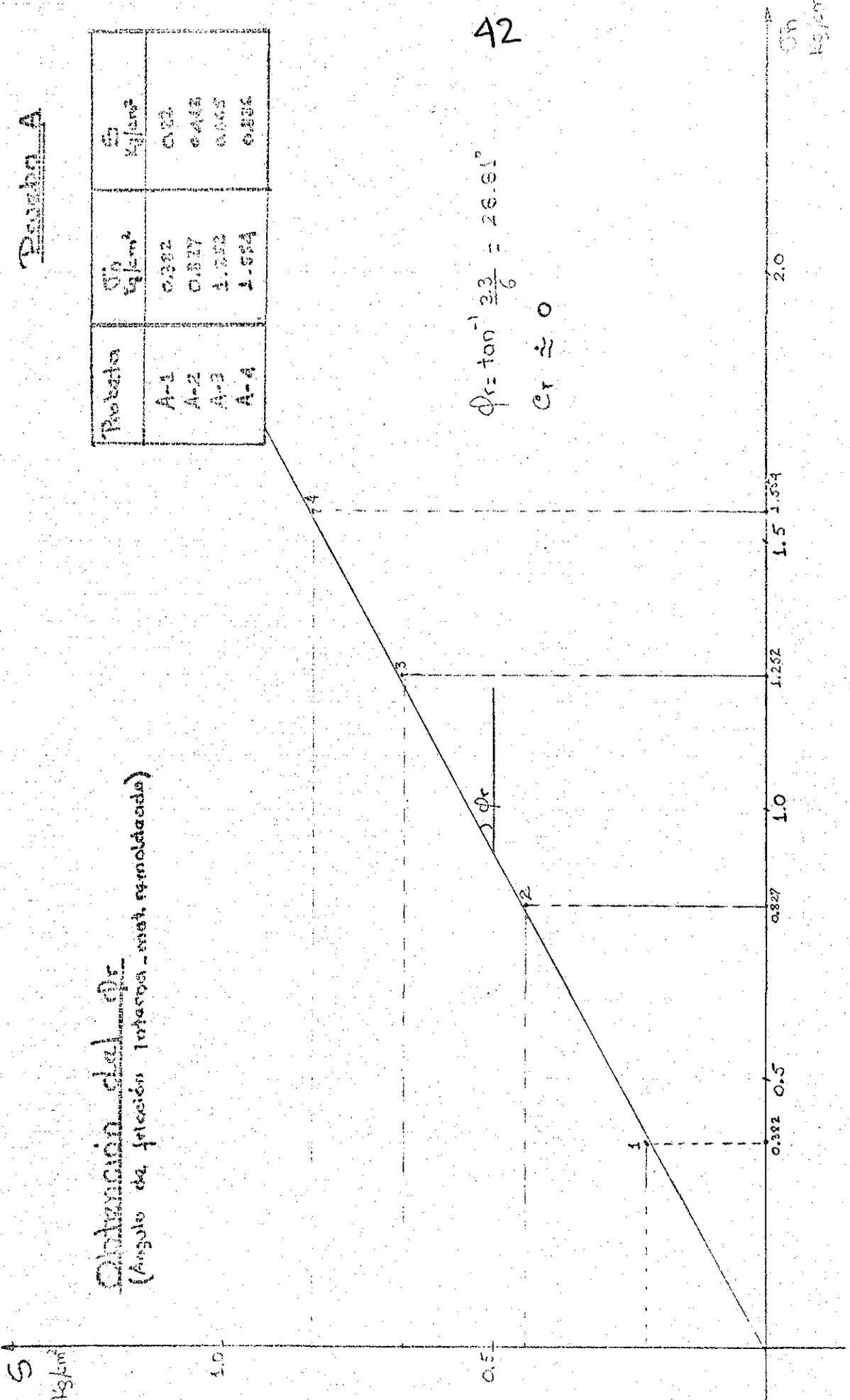
$$\phi_r = \tan^{-1} \frac{23}{6} = 28.61^\circ$$

$$C_r \approx 0$$

S  
kg/cm<sup>2</sup>

1.0

0.5



$\sigma_n$   
kg/cm

2.0

1.5

1.252

1.0

0.827

0.5

0.382

Resultados Prueba A

Material Remoldado

Gráfica IV-a

S.C.P.E.

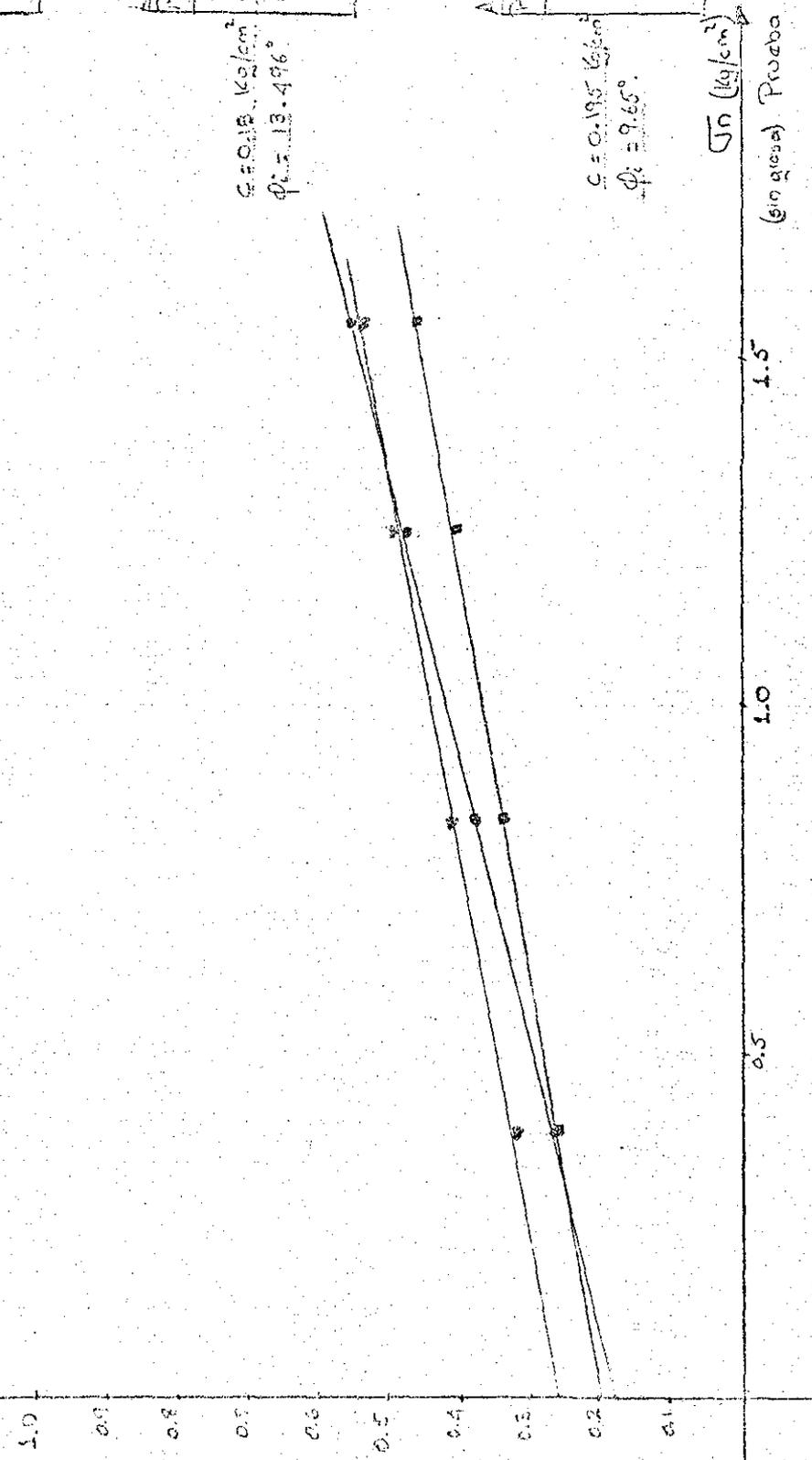
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Obtención del  $\phi$  y  $c$   
Gráficas IV. b. a. e

Resultados de las pruebas B, C, E

Resultados obtenidos de las pruebas

$c = 0.56 \text{ kg/cm}^2$   
 $\phi = 10.26^\circ$



Gráfica IV. b.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Prueba B

Tajón vs. Mat. Remolda

Prueba	$T_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$S$ (kg/cm <sup>2</sup> )
B-1	0.322	0.32
B-2	0.333	0.415
B-3	1.249	0.495
B-4	1.550	0.526

Prueba C

Latón vs. Mat. Remolda

Prueba	$T_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$S$ (kg/cm <sup>2</sup> )
C-1	0.376	0.270
C-2	0.827	0.381
C-3	1.252	0.477
C-4	1.550	0.551

Prueba E

Acero Latón + Mat. Remolda

Prueba	$T_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$S$ (kg/cm <sup>2</sup> )
E-1	0.333	0.320
E-2	0.333	0.335
E-3	1.250	0.495
E-4	1.550	0.461

$c = 0.195 \text{ kg/cm}^2$   
 $\phi = 9.65^\circ$

Prueba B: W Tajón vs. Mat. Remolda (sin grasa)  
Prueba C: e Latón vs. Mat. Remolda (sin grasa)  
Prueba E: a Acero Latón + Mat. Remolda (sin grasa)

Obtención del  $\phi_i, c$ .

Gráficas IV d, f, g

Resultados de las pruebas D, F y G  
(con grosor tipo A y B)

Resultados obtenidos de las gráficas

$c = 0.12 \text{ kg/cm}^2$   
 $\phi_i = 6.28^\circ$

$c = 0.16 \text{ kg/cm}^2$   
 $\phi_i = 7.41^\circ$

$c = 0.14 \text{ kg/cm}^2$   
 $\phi_i = 6.52^\circ$

Prueba D

Prueba	$U_0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$S \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
D-1	0.892	0.191
D-2	0.828	0.197
D-3	1.236	0.250
D-4	1.516	0.252

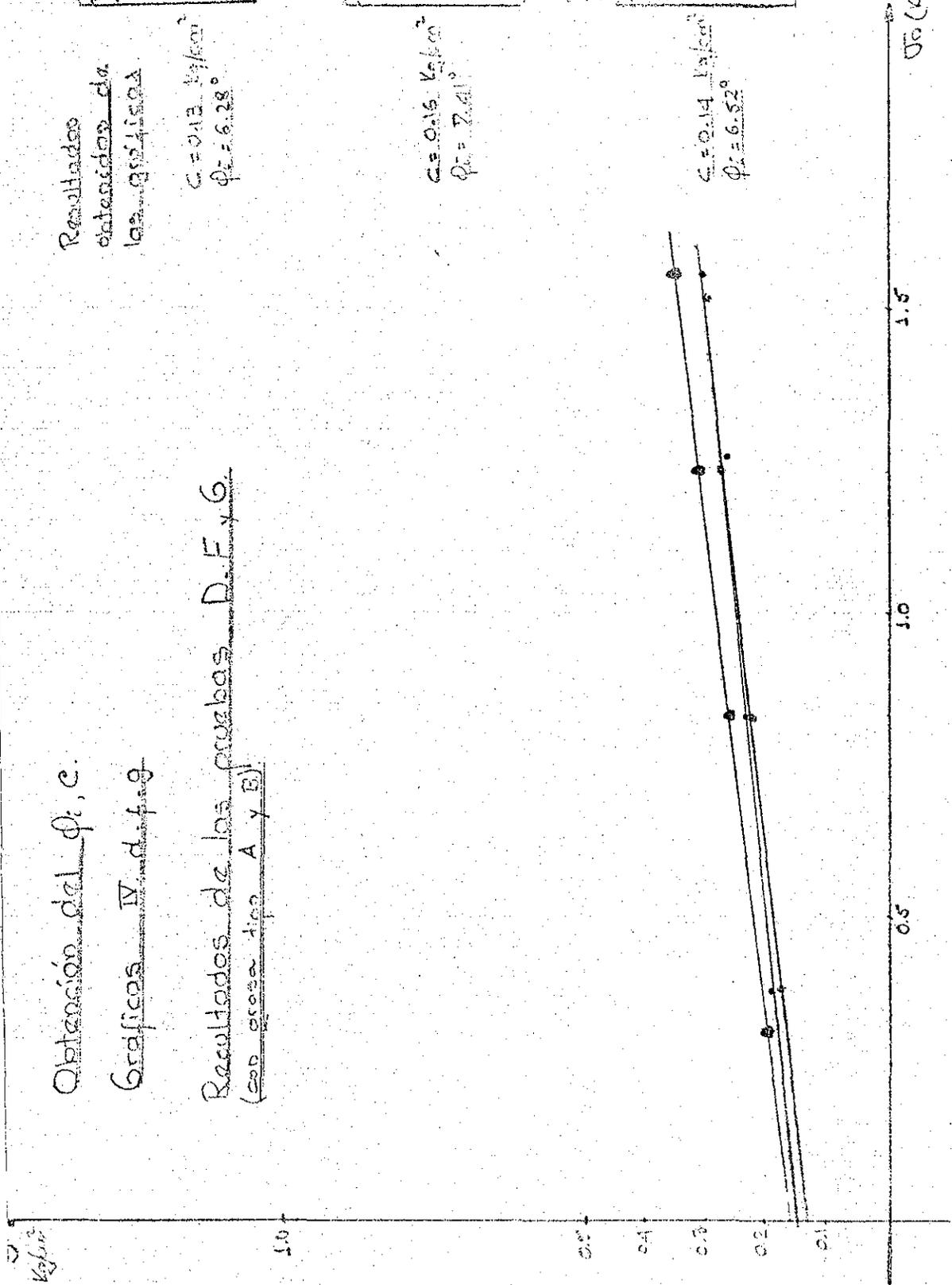
Prueba F

Prueba	$U_0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$S \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
F-1	0.710	0.195
F-2	0.833	0.259
F-3	1.230	0.310
F-4	1.550	0.358

Prueba G

Prueba	$U_0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$S \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
G-1	0.382	0.190
G-2	0.860	0.232
G-3	1.250	0.275
G-4	1.550	0.317

44



Prueba D: • Latón + Grasa A vs. Mat. R.  
Prueba F: • Teflón + Grasa A vs. Mat. R.  
Prueba G: • Latón + Grasa B vs. Mat. R.

Gráfica IV.c.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

#### IV-5. Crítica al Aparato de Corte Directo.

De acuerdo al fundamento teórico de éste trabajo, el cuál ya se expuso en los anteriores capítulos; el valor del Factor de corrección por la fricción lateral, es función de los parámetros  $\phi_r$  y  $\phi_i$ ; siendo  $\phi_i$  el valor del ángulo de fricción interna de la interfase suelo-anillo. En éste sentido, para poder obtener el valor de éste parámetro, era necesario buscar una prueba que permitiera, dentro de los recursos disponibles, la reproducción de dicha interfase y así poder determinar sus parámetros de resistencia al esfuerzo cortante. La prueba de corte directo reúne éstos requisitos, es decir, además de ser un método utilizado para la obtención de parámetros de resistencia al corte; permite reproducir análogamente la interfase suelo - anillo; tal como se describe en la Fig. IV-2 pág.39 ; además de ser un recurso disponible.

Pero no por las ventajas ya mencionadas, se debe pasar por alto las limitaciones que posee ésta prueba. Mencionaré algunas que pueden influir en el tipo de resultados obtenidos,

- Durante la segunda etapa de la prueba, donde se aplica el esfuerzo tangencial a la probeta, el cuál provoca la distorsión del espécimen de prueba confinado en las cajas, el estado de esfuerzos generado no es uniforme a lo largo del plano de corte. Ahora bien, el área nominal de corte ésta reducida debido al desplazamiento del marco superior, éste último efecto puede ser corregido.
- En la medida en que se aplica el esfuerzo tangencial; se provoca la distorsión angular de la probeta. En el caso del aparato de corte directo, no se puede llevar la relación  $\tau$  vs  $\gamma$ ; siendo  $\tau$ = esfuerzo tangencial aplicado y  $\gamma$ = distorsión angular, debido a limitaciones innatas del aparato. (La probeta ésta confinada en un marco fijo).

En realidad, el espesor de probeta donde se produce la distorsión se limita a una zona muy pequeña en un plano horizontal en la interfase,

de hecho el fenómeno es el de cisalleo puro entre los dos marcos. Lo anterior hace que las pruebas realizadas sean representativas de la interfase real anillo - muestra que se tiene durante una prueba de consolidación, como ya se dijo anteriormente. De acuerdo al fundamento teórico, en éste caso nos interesa la distorsión de la membrana de material remoldeado que constituye la interfase suelo - anillo.

Durante la realización de las pruebas, se verificó que en el momento de aplicar la carga tangencial, cuando ya se había consolidado la probeta bajo el esfuerzo normal aplicado y lo cual se podía constatar por medio de los registros  $\delta$  vs.  $\log. t$  (curvas de consolidación), la distorsión angular del suelo que ocupa la interfase entre los dos marcos empezaba lentamente, presentando una falla súbita, esto debido a los factores ya mencionados. Por lo que, no se llevaron los registros de  $\tau$  vs.  $\gamma$ , obteniéndose entonces el valor de  $\tau_{máx.}$ , que es el valor buscado.

En el caso de que se desee tener los valores de  $\tau$  vs.  $\gamma$  sería necesario el empleo de un aparato que permitiera la distorsión angular de toda la probeta; es decir, un marco cuyas paredes no ofrecieran resistencia a la distorsión angular de la probeta producida por la aplicación de la carga tangencial. Pero este fenómeno no es el que se verifica en la prueba del odómetro. El espesor de la membrana de suelo remoldeado entre suelo inalterado y el anillo es muy pequeño; por lo que podemos concluir que las pruebas realizadas en el aparato de corte directo sí son representativas para obtener los parámetros de resistencia en la interfase.

Durante la segunda etapa de la prueba, cuando se aplican los incrementos de carga tangencial, cada incremento se dejó acutar durante un tiempo tal que ya no se registrara cambios en la lectura del extensómetro vertical. No se llevaron registros de  $\delta$  vs  $t$ , puesto que los movimientos que se registraban en dicho extensómetro eran casi inapreciables, debido al pequeño espesor de material sometido a la distorsión angular (material que ocupa la separación entre los marcos).

## CAPITULO V

IV-a CONCLUSIONES

De acuerdo a la sustentación Teórica de éste trabajo, y a los resultados obtenidos, los cuales se consignan en la siguiente tabla; podemos concluir:

TABLA IV-3			
Prueba	Modalidad	$\phi_i$	C (Kg/cm <sup>2</sup> )
A	Material Remoldeado	$\phi_r=28.81^\circ$	—
B	Teflón vs. Material Remoldeado	10.76°	0.26
C	Latón vs. Material Remoldeado	13.50°	0.18
D	Latón + Grasa A vs. Material Remoldeado	6.28°	0.13
E	Acero Inoxidable + Grasa vs. Material Remoldeado	9.65°	0.195

Prueba	Modalidad	$\phi_i$	C(Kg/cm <sup>2</sup> )
F	Teflón + Grasa A vs. Material Remoldeado	7.41°	0.16
G	Latón + Grasa B vs. Material Remoldeado	6.52°	0.14

1. Es evidente la influencia de la fricción en el valor del esfuerzo vertical bajo el cuál se consolida una probeta durante una prueba de consolidación. Esto se pudo constatar durante la realización de las pruebas en el Aparato de corte, donde se midió la resistencia al esfuerzo cortante en la interfase suelo - anillo.
2. De los resultados obtenidos (ver tabla de resultados), podemos ver como los metales empleados en las pruebas B, C y E (Teflón, Latón y Acero Inoxidable + Grasa A respectivamente), presentan un comportamiento semejante. Esta semejanza de resultados se hace más evidente en las pruebas donde se empleó un repelente al agua y al suelo sobre el metal, (ver gráficas pág. 44 donde se muestran los resultados de las pruebas D, F y G: que corresponden a Latón + Grasa A, Teflón + Grasa A, Latón + Grasa B.), se hace evidente la reducción en el valor de los parámetros de resistencia en la interfase con el empleo de la grasa repelente.
3. De los resultados de las pruebas D y G (Latón + Grasa A y Latón + Grasa B respectivamente), donde se empleó el mismo metal y se usaron dos tipos diferentes de repelentes; los resultados son muy semejantes (ver gráficas, pág. 44), llegando a la conclusión de que tiene el mismo efecto sobre el valor de la fricción, el empleo de cualquiera de los dos tipos de repelentes que se usaron en ésta investigación.
4. Los anillos fabricados en Teflón presentan la mayor adherencia en

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

en la interfase suelo - anillo, casi un 50% mayor que la encontrado con los otros metales; ésta adherencia se reduce notablemente con el empleo de repelente (ver Tabla de Resultados). Es de notar que en el momento de desmontar la prueba de Teflón con Grasa A, se encontró que la grasa repelente estaba totalmente adherida a la muestra, con la superficie de Teflón libre de grasa repelente. Esto no sucedió con los otros metales empleados en las pruebas. Se concluye entonces que siendo el Teflón un material impermeable, donde no existe absorción de grasa y que ésta es tomada por el suelo, produciéndose una mayor contaminación de la muestra; y según los resultados que reportó ésta prueba, los parámetros de resistencia en la interfase son semejantes a los obtenidos en las demás pruebas (ver Tabla de Resultados). Esto se explica, como se vió en el capítulo III, página 25 donde se analiza la influencia de la adherencia en el valor de la resistencia por fricción en la interfase, llegando a la conclusión que para que exista el movimiento relativo que se presenta en la interfase suelo - anillo durante el proceso de consolidación, es necesario romper la adherencia en dicha interfase, quedando por rebasar entonces la resistencia residual, la cuál depende de las fuerzas de rozamiento en la interfase.

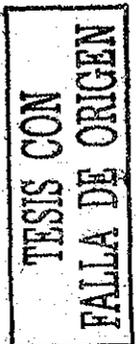
5. Las dimensiones del anillo en que se realice una prueba de consolidación juega un papel preponderante en el valor de la fricción. A mayor altura del anillo empleado, mayor será el efecto de la fricción lateral; lo ideal sería emplear anillos de poca altura (1-2cms), pero esto iría en detrimento de otros factores que afectan la prueba de consolidación, como es el caso del remoldeo de la probeta durante el labrado. Con el fin de ilustrar la importancia de la relación  $\frac{D}{2H}$  en el valor de la fricción; en el Apéndice A (pág.55) aparece un nomograma donde se relacionan los valores  $f_{\frac{cm}{\sigma a}}$  vs  $\frac{D}{2H}$ ; de la gráfica obtenida podemos corroborar la importancia de la relación  $\frac{D}{2H}$ , siendo 2H la altura del anillo. Vemos que, a mayores valores de la relación ( $\frac{D}{2H}$ ), menor factor de corrección se obtiene

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

por efecto de la fricción. Podemos observar que para valores de  $\frac{D}{2H} > 4$ , (lo cuál corresponde a anillos de altura menores de 2 cms para un diámetro estándar de 8cms), se estabiliza el valor de  $f = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$  en un rango entre 0.97 y 0.985 la curva A (Material del anillo: Latón sin grasa) y un rango entre 0.985 y 0.99 para la curva B (Material del anillo: Latón con grasa tipo A). Esto infiere entonces que para anillos de Latón con o sin grasa y de altura menor o igual a dos cms., el efecto de la fricción lateral varía entre un 1% y 3% de la carga aplicada; lo cuál implica un pequeño factor de corrección. Estos resultados deben ser similares para los otros metales empleados, incluyendo el Teflón, debido a la semejanza encontrada en los resultados.

6. Si tenemos en cuenta otros factores que afectan la prueba de consolidación, como lo es el remoldeo de la probeta durante el labrado (Tesis de Maestría del Ing. José Moronta Q.; quién recomienda el empleo de anillos de 2.5 cms. de altura como mínimo, para que la corrección por remoldeo sea la máxima tolerable. Esta información fué obtenida por comunicación personal con el Ing. Moronta, quién actualmente se encuentra desarrollando su tesis, la cuál lleva como título: "Influencia del Remoldeo de la Probeta durante una Prueba de Consolidación".). Para un anillo de altura = 2.5 cms. y diámetro  $D = 8$  cms, corresponde una relación de  $\frac{D}{2H} = 3.2$ ; vemos en el nomograma que a dicha relación de  $\frac{D}{2H}$  corresponde valores de  $\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = 0.96$  para la curva A (Latón sin grasa) y de 0.98 para la curva B (Latón con grasa). Lo anterior implica un efecto de la fricción del 4% y 2% de la carga aplicada, que constituye un valor del factor de corrección razonable. Con ésto concluimos que la altura mínima de anillos a emplear durante una prueba de consolidación es de 2.5 cms.

7. Ahora bien, en el caso de emplear anillos de mayor altura, entre 3 y 5 cms; donde la relación de  $\frac{D}{2H}$  está entre 2.7 y 1.6, para un diámetro estándar de 8 cms, vemos que la relación  $f = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$  está entre 0.92 y 0.955 para la curva y entre 0.96 y 0.98 para la curva B. Esto im



plica factores de corrección mayores debido al incremento de la altura del anillo y estarán en el rango de 8% - 5% de la carga aplicada para la curva A y entre 4% - 2% para la curva B.

8. En el Apéndice B (pág.58) se hace un ejemplo de corrección de una curva de compresibilidad por el efecto de fricción lateral. Se consignan todos los datos relacionados con la prueba. En la gráfica B-1 (pág.61), podemos observar la influencia de la corrección efectuada en la configuración de la curva de compresibilidad.

En la pág. 60, aparece una tabla donde se relacionan los parámetros obtenidos de ésta prueba sin corrección y los mismos parámetros ya corregidos por efecto de la fricción. Se puede observar que la diferencia entre ellos es pequeña, pues en ésta prueba se utilizó un anillo de poca altura (2 cms) y además se empleó grasa lubricante.

V-b. Recomendaciones:

De las conclusiones obtenidas, se pueden desprender las siguientes recomendaciones:

1. En general, el metal a escoger la fabricación de anillos de consolidación, dependerá del tipo de metal que se disponga y del factor económico, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos, los metales empleados incluyendo el Teflón presentan comportamientos semejantes. Se debe tener la precaución de que los anillos en el contacto con el suelo, presenten superficies que no sean porosas, perfectamente lisas, libres de rugosidades.
2. El empleo de grasa repelente durante la realización de la prueba, reduce sustancialmente el valor de la fricción lateral.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3. Por el análisis hecho en las conclusiones anteriores sobre la importancia de la relación  $\frac{D}{2H}$ , se recomienda el empleo de anillos con una altura mínima de 2.5 cms. El valor máximo a emplear dependerá de las condiciones particulares de la prueba, generalmente este límite esta entre 5 - 6 cms, teniendo en cuenta que a mayor altura del anillo mayor será el factor de corrección por fricción y mayor será la duración de la prueba.
  
4. En cuanto a la aplicación práctica de este trabajo y de acuerdo al valor del factor de corrección obtenido, vemos que con el conocimiento de las dimensiones del anillo, del metal que se haya empleado en su fabricación y del ángulo de fricción interna de un material remoldeado, se puede calcular fácilmente el factor de corrección por fricción ( Las arcillas remoldeadas reportan un  $\phi_r$  entre 28° y 30°).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## REFERENCIAS

1. D. E. P. F. I. U. N. A. M.  
Laboratorio de Mecánica de Suelos.  
Curso 445108 - 1976.  
Pág: 22-30 ; 55-70; 79-100.
  
2. SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
Manual de Mecánica de Suelos  
México - 1970  
Parte 2, capítulos 2,4,7, 10.
  
3. WILLIAM LAMBE  
Soil Testing for Engineers  
The Massachusetts Institute of Technology  
John Wiley & Sons. 1951.  
Pág: 80 - 81
  
4. VAN ZELST - THEODORE  
Proceedings of the second International conference  
on Soil Mechanics and Foundation Engineering.  
Rotterdam 1948.  
"An Investigation of the factors affecting Laboratory  
consolidation of Clay"  
Pág: 52 - 61

5. DONALD W. TAYLOR,  
Research of Consolidation of Clays.  
Massachussetts Institute of Technology.  
1942.
  
6. ZEEVAERT W. LEONARDO  
Foundation Engineering for difficult Sobsoil  
Condition.  
Primera Edición - Van Nostrand Reinhold Company. 1972  
Sección II-4. Pag. 115 - 142
  
7. ZEEVAERT W. LEONARDO.  
Apuntes de Mecánica de Suelos.  
Volumen II - Tomo I - Sección III-5. Pag.  
Facultad de Ingeniería - UNAM. 1966.

APENDICE A

Nomogramas.- Obtención del Factor de Corrección

De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo III, se llegó a la siguiente - expresión para el factor de corrección:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{1}{\epsilon} \{ 1 - e^{-\epsilon} \} = f$$

donde . 
$$\epsilon = \frac{2K\phi H}{R} = \frac{4K\phi H}{D} = \frac{4K\phi}{\frac{D}{H}} = \frac{2K\phi}{\frac{D}{2H}}$$

- .  $k\phi = (1 - \sin \phi r) \tan \phi i$
- .  $2H =$  altura del anillo (anillo flotante)
- .  $D =$  diámetro del anillo

Con el fin de visualizar mejor la influencia de la relación  $\frac{D}{2H}$  en el valor del factor de corrección, se harán gráficas de  $\frac{D}{2H}$  vs.  $f$ . Emplearemos los resultados obtenidos de las pruebas realizadas (Pág. 41).

El primer Nomograma se hizo para las pruebas C y D (Latón y latón + grasa tipo A), con el fin de poder comparar los resultados, cuando empleando un mismo metal para el anillo, uno de ellos se lubrica con grasa de silikón, con lo que se reduce sustancialmente el efecto de la fricción.

A continuación, está la tabulación de los valores  $\frac{D}{2H}$  vs  $\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$

1. Nomograma (pág 57)

Latón : Curva A

Latón + Grasa tipo A : Curva B

- Latón: Prueba C  $\phi i = 13.50^\circ$   $D = 8$  cms  
(pág. 41)  $\phi r = 28.81^\circ$   $2H =$  altura de anillo

- Latón sin grasa

Prueba C

2H CMS.	$\frac{D}{2H}$	$K\phi$	$\phi$	$\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = f$
1	8.0	0.1244	0.0311	0.9846
1.5	5.31	0.1244	0.0467	0.9770
2.0	4.0	0.1244	0.0622	0.9695
2.5	3.2	0.1244	0.0778	0.9621
3.0	2.67	0.1244	0.0932	0.9548
3.5	2.29	0.1244	0.1087	0.9476
4.0	2.0	0.1244	0.1244	0.9403
4.5	1.78	0.1244	0.1398	0.9332
5.0	1.60	0.1244	0.1555	0.9261
6.0	1.33	0.1244	0.1871	0.9120

- Latón + Grasa tipo A -

Prueba D

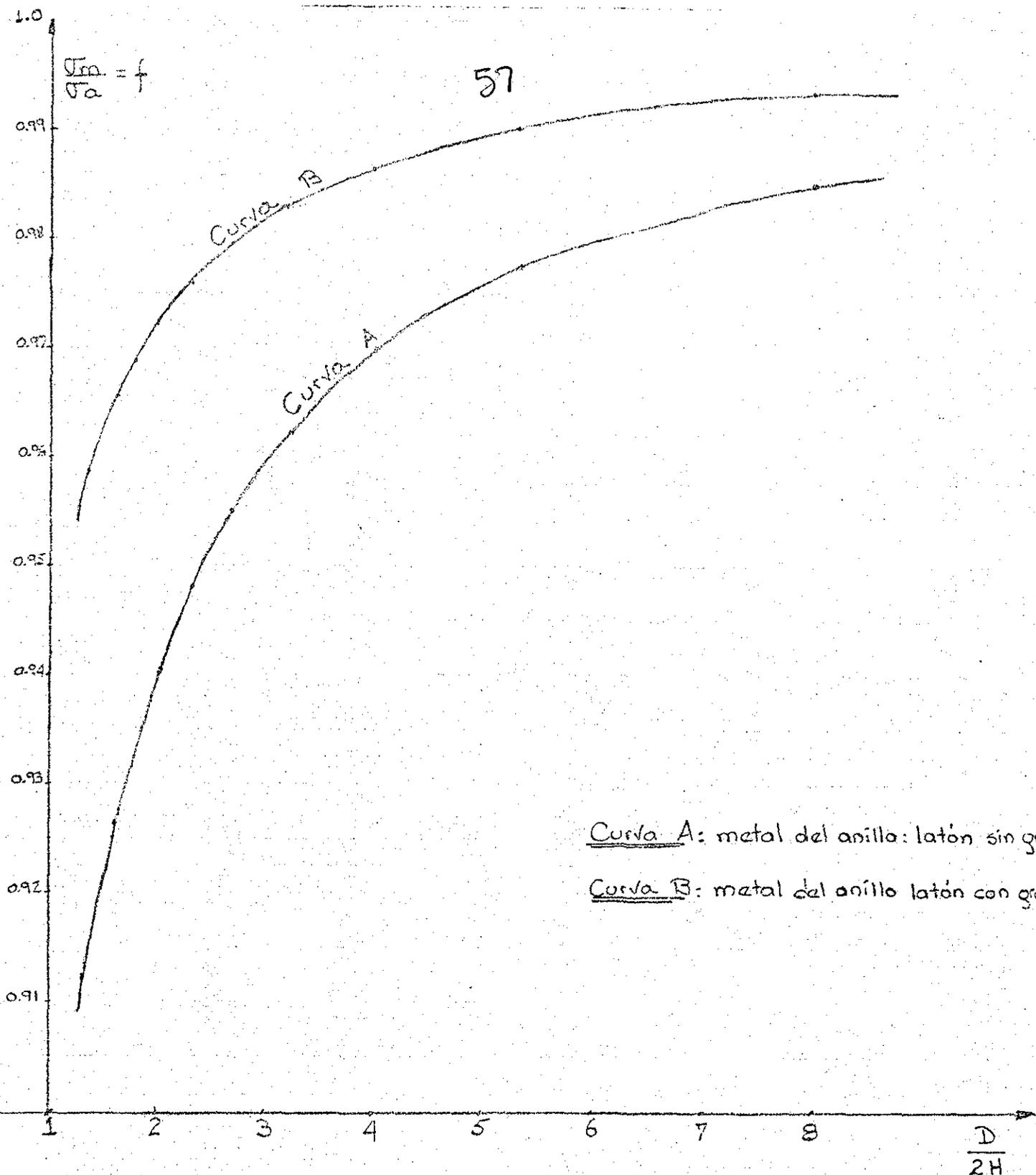
$\phi_i = 6.28^\circ$

D = 8 cms.

$\phi_i = 28.81^\circ$

2H = altura anillo

2H	$\frac{D}{2H}$	$K\phi$	$\phi$	$\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = f$
1	8.0	0.0570	0.0143	0.9928
1.5	5.333	0.0570	0.214	0.9894
2.0	4.0	0.0570	0.0285	0.9859
2.5	3.2	0.0570	0.0356	0.9824
3.0	2.67	0.0570	0.0427	0.9789
3.5	2.29	0.0570	0.0498	0.9755
4.0	2.0	0.0570	0.0570	0.9720
4.5	1.48	0.0570	0.0640	0.9686
5.0	1.60	0.0570	0.0712	0.9652
6.0	1.33	0.0570	0.0857	0.9583



Curva A: metal del anillo: latón sin gras  
Curva B: metal del anillo latón con gras

Nomograma →  $\frac{D}{2H}$  vs.  $\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = f$

Para: D = diametro del anillo = 8 cms  
 2H = altura del anillo (variable)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

APENDICE B

Ejemplo: Corrección por fricción a una curva de Compresibilidad

Con el fin de dar una mejor ilustración sobre el efecto de la fricción lateral en los parámetros obtenidos de una prueba de consolidación. Se corrigió una curva de compresibilidad tomada de la tesis del Ing. Li Xiang Yue. Los datos de la prueba se consignan más adelante. También se hace una corrección a los parámetros obtenidos, con el fin de visualizar la influencia de la fricción lateral.

Datos sobre la Prueba:

Se realizó una prueba de Consolidación en una arcilla del Valle de México; los datos generales de la prueba son:

- Altura de anillo = 2 cms.
- Diámetro del anillo = 8 cms.
- Material en que se construyó el anillo = Acero inoxidable
- No. de Incrementos = 6 con una duración de 24 hrs. cada uno
- $\sigma_{oi} = 1.57 \text{ kg/cm}^2$
- $\sigma_b = 2.10 \text{ kg/cm}^2$
- $q_u = 1.85 \text{ kg/cm}^2$
- Se empleó grasa de silikón tipo A

Datos del Material:

Ss = 2.352  
U.L = 401.3  
L.P = 182.5  
IP = 218.8  
 $\omega\%$  = 443.9%  
 $\%S$  = 98.2%  
e = 5.84

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Obtención del factor de corrección

. De acuerdo con esta investigación, la expresión para obtener el factor de corrección por fricción es:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{1}{f} \{ 1 - e^{-\phi} \} = f$$

- donde:
- $\phi = 2 K\phi \left( \frac{2H}{D} \right)$
  - $K\phi = (1 - \text{Sen } \phi_r) \tan \phi_i$
  - $2H = \text{altura del anillo} = 2 \text{ cms.}$
  - $D = \text{diámetro del anillo} = 8 \text{ cms.}$

De acuerdo con los resultados de la prueba E (Acero Inoxidable más grasa tipo A - pág 41), el valor de  $\phi_i = 9.65^\circ$ . Emplearemos el  $\phi_r = 28.81^\circ$  obtenido con el material empleado en esta investigación.

Tenemos entonces:

- $\cdot k\phi = (1 - \text{Sen } 28.81^\circ) \tan 9.65^\circ = 0.088$
- $\cdot e = 2 K\phi \times \frac{2}{8} = 0.044$
- $\cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_a} = f = 0.978$

Con el valor obtenido del factor de corrección.  $f = 0.978$  es posible obtener el valor real bajo el cual se consolida la muestra  $\sigma_m = f \sigma_a$

Con la expresión anterior se corrigió la curva de compresibilidad obtenida (Ver gráfica - pág 61).

También se hizo una corrección de parámetros como:

- $M_v = \frac{\delta b}{2H \cdot \Delta \sigma_a}$       Coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria
- $M_t = \frac{C_t}{2H \cdot \Delta \sigma_a}$       Coeficiente de compresibilidad volumétrica consolidación secundaria
- $C_v = \frac{k}{M_v \cdot \gamma \omega}$       Coeficiente de consolidación

La corrección a estos parámetros se hizo de la siguiente manera:

$$Mv' = \frac{\delta b}{2H \cdot \Delta \sigma m} = \frac{\delta b}{2H \cdot f \Delta \sigma a} = \frac{Mv}{f}$$

$$Mt' = \frac{Ct}{2H \cdot \Delta \sigma m} = \frac{Ct}{2H \cdot f \Delta \sigma a} = \frac{Mt}{f}$$

$$Cv' = \frac{k}{Mv' \cdot \gamma \omega}$$

Siendo  $Mv'$ ,  $Mt'$  y  $Cv'$  los parámetros ya corregidos por fricción  
(Ver Resultados Tabla V-B.1).

TABLA V-B.1

No. de incremento	$\frac{cm}{kg/cm^2}$	$\times 10^{-3}$ Mv	$cm^2/kg$ Mv'	$\times 10^{-3}$ Mt	$cm^2/kg$ Mt'	$\times 10^{-3}$ Cv	$cm^2/seg$ Cv'	$\times 10^{-9}$ cm/seg k
1	0.1722	-	-	-	-	-	-	
2	0.4324	18.31	18.72	4.21	4.31	18.58	18.17	340.2
3	0.6930	15.88	16.24	5.16	5.28	17.81	17.41	282.8
4	0.9530	17.05	17.43	8.69	8.89	9.02	8.82	153.8
5	1.2140	13.84	14.15	10.82	11.06	16.94	16.57	234.4
6	1.474	13.82	14.13	13.76	14.07	14.01	13.70	193.6
7	1.735	14.41	14.73	17.66	18.06	17.27	16.90	248.9
8	1.995	13.35	13.65	35.74	36.54	13.48	13.18	179.9
9	2.255	11.09	11.34	58.85	60.17	16.39	16.03	181.8

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

10

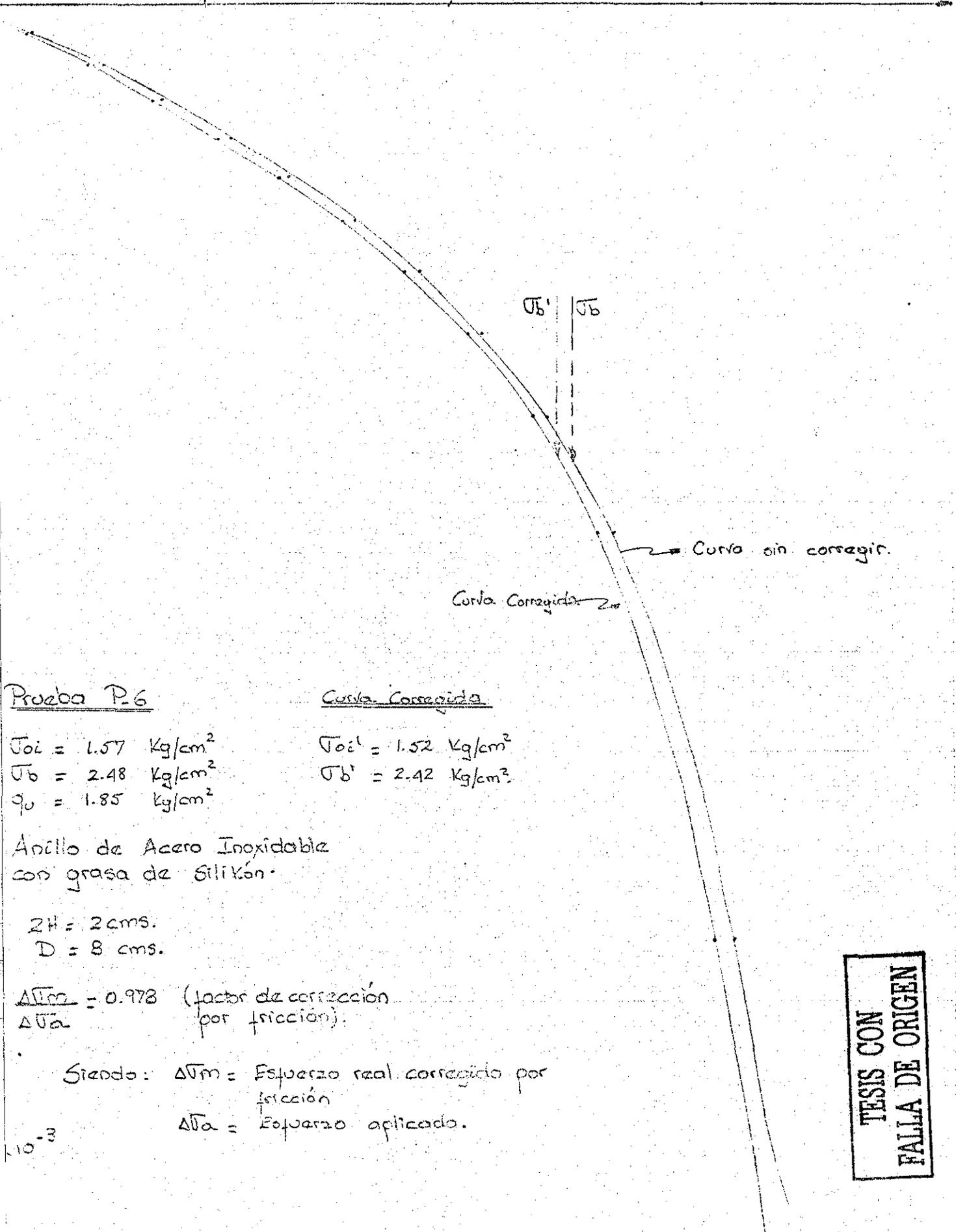
20

Cel

30

 $\sigma$  (kg/cm<sup>2</sup>)

40

Prueba P-6

$$\begin{aligned}\sigma_{0i} &= 1.57 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_b &= 2.48 \text{ kg/cm}^2 \\ q_0 &= 1.85 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Curva Corregida

$$\begin{aligned}\sigma_{0i}' &= 1.52 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_b' &= 2.42 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Anillo de Acero Inoxidable  
con grasa de Silicón.

$$\begin{aligned}2H &= 2 \text{ cms.} \\ D &= 8 \text{ cms.}\end{aligned}$$

$$\frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\sigma_a} = 0.978 \quad (\text{factor de corrección por fricción}).$$

Siendo:  $\Delta\sigma_m$  = Esfuerzo real corregido por fricción  
 $\Delta\sigma_a$  = Esfuerzo aplicado.

 $10^{-3}$ 

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

D.E.P.F.I.

FACTORES QUE AFECTAN LA PRUEBA DE CONSOLIDACION EN EL ODOMETRO

HINCHAMIENTO

DIRECTOR DE TESIS: LEONARDO ZEEVAERT W.

POR: SONIA CRISTINA POSADA B.

MEXICO. NOVIEMBRE DE 1984.

# CONTENIDO

	PÁGINA
CAPÍTULO I: <u>Introducción.</u>	1
CAPÍTULO II: <u>Estado del Arte</u>	3
CAPÍTULO III: <u>Fundamento Teórico</u>	
III.1 Conceptos Básicos	8
III.2 Teoría para determinar la oquedad y el grado de saturación de campo ( $e_o, S_o$ )	11
CAPÍTULO IV: <u>Investigación de Laboratorio</u>	17
IV.1 Clasificación del material empleado	18
IV.2 Equipo	18
IV.3 Procedimiento	20
IV.4 Calibración del Equipo	22
IV.5 Labrado de la Probeta	24
IV.6 Resultados obtenidos	26
CAPÍTULO V: V.a <u>Conclusiones</u>	39
V.b. <u>Recomendaciones.</u>	41

REFERENCIAS.

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	=	Area - Parámetro
e	=	Relación de vacíos
%S	=	Grado de Saturación
H	=	Altura
Ip	=	Índice de Plasticidad
L.L	=	Límite líquido
L.P	=	Límite Plástico
P	=	Presión total
qu	=	Resistencia a la compresión simple
Ss	=	Gravedad específica
t	=	Tiempo
to	=	Tiempo inicial
V	=	Volumen
%w	=	Contenido de agua
$\gamma_m$	=	Peso volumétrico.
$\sigma_v$	=	Esfuerzo efectivo vertical
$\beta$	=	Parámetro
P.C.R	=	Potencia Capilar Remanente
U	=	Presión hidrostática
$\sigma_b$	=	Esfuerzo crítico

## CAPITULO I

### Introduccion:

En Mecánica de Suelos, cuando se realizan pruebas de consolidación en el laboratorio, es bien conocido el fenómeno de hinchamiento que sufre la probeta de suelo en el momento de inundarla. Al extraer una muestra de suelo, donde  $P = 0$ , se provoca un estado de succión en el suelo; éste termino de succión también es conocido como el de potencia capilar remanente, considerando que el suelo se comporta como un sistema de conductos capilares.

La presente investigación va dirigida hacia el análisis del comportamiento mecánico del fenómeno de hinchamiento (Este fenómeno es debido a la presencia de minerales activos, y se presenta con mayor evidencia en suelos expansivos. Ver Referencia No. 1), es decir, obtener a través de laboratorio y de la interpretación de los resultados obtenidos, un método que conduzca a la predicción del hinchamiento en función del potencial capilar remanente del suelo, cuando éste se encuentra en un estado de esfuerzos donde  $P = 0$  y se satura por inundación a partir de su humedad natural.

La realización de este objetivo, busca mejorar el método con que se hacen las pruebas de consolidación en el laboratorio.

Se valorará la potencia capilar remanente de algunas muestras inalteradas de suelo del valle de México, en pruebas realizadas en un consolidómetro de palanca lineal. Este instrumento se describe en detalle en el capítulo III.

El conocimiento del valor de la potencia capilar remanente de una probeta de suelo sometida a una prueba de consolidación, es la de transformar dicho valor en una carga adicional inicial que impida el hinchamiento de la probeta y el consecuente reblandecimiento de la misma, debido a la adsorción de agua por la presencia de minerales activos.

Todos estos conceptos, serán tratados más ampliamente en el capítulo III.

## CAPITULO II

### Estado del Arte

Se hizo una revisión a la Literatura Técnica referente al tópicó de este trabajo, donde se analiza la influencia de la presencia de minerales activos de arcilla en las propiedades mecánicas del suelo, y de la manera como el fenómeno de hinchamiento que presentan los suelos en el momento de inundarlos afectan dichas propiedades mecánicas.

Se encontraron pocas referencias al respecto. A continuación, se presenta un resumen de estos trabajos:

#### II.1 Freddy Sánchez Naveda:

"Estudio de un suelo expansivo de Coro - Venezuela".

Tesis UNAM - 1979 - SAN.

En dicho trabajo, el autor hizo un análisis del comportamiento mecánico del fenómeno expansivo de un material con un alto contenido de minerales activos de arcilla (Suelo expansivo de Coro, Venezuela). Efectuó pruebas con el fin de determinar el potencial expansivo de dicho suelo; prue

bas de potencial expansivo bajo carga constante en un consolidómetro de brazo semi-circular y pruebas de potencial expansivo a volumen constante en un consolidómetro de Palanca Lineal (El mismo utilizado en este trabajo. Ver Capítulo IV).

El Autor hace mención de la importancia de las propiedades índices para la clasificación de los suelos expansivos, se ha demostrado que el Índice de Plasticidad es función del tipo y de la cantidad de minerales de Arcilla. Con el fin de verificar la influencia de la presencia de minerales activos de arcilla en las propiedades de compresibilidad del suelo, se realizaron pruebas de consolidación paralelas en este material, unas bajo el contenido de humedad natural y otras con el material saturado. Se observaron diferencias en las curvas de compresibilidad.

Concluye que la expansión es una propiedad mecánica que esta relacionada directamente con el contenido de minerales de activos de arcilla, los cuales son afines al agua, de tal manera que el contacto con esta se expanden fuertemente. Esta propiedad puede ser cuantificada por medio del cálculo del potencial expansivo. La compresibilidad también se ve afectada por la presencia de dichos minerales activos; pues éstos suelos al saturarse se expanden, provocando una reorientación de las partículas, lo cuál origina que el material aumente su compresibilidad, puesto que se pierde la adherencia y el suelo se desintegra sino esta confinado. Esto también influye en las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo (ver referencia No. 2).

## II.2 Teodore Van Zelst. (1948)

Proceedings of the second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.  
Rotterdam 1948.

"Una investigación de los factores que afectan las pruebas de consolidación en el Laboratorio".

En esta investigación se realizaron cuatro pruebas de consolidación para lelas sobre el mismo tipo de suelo (Arcilla azul inórganica de un depósito lacustre de Minnesota - E.U.A. Con  $\omega\% = 43\%$ ,  $e = 1.18$ ,  $\%S = 99\%$ ), en unas se permitía la expansión del material bajo una pequeña carga inicial, en donde la probeta estaba colocada en un anillo sobre-diseñado con el fin de prevenir que el material se saliera fuera del anillo; y en las otras se impedía la expansión, colocando un incremento inicial mayor.

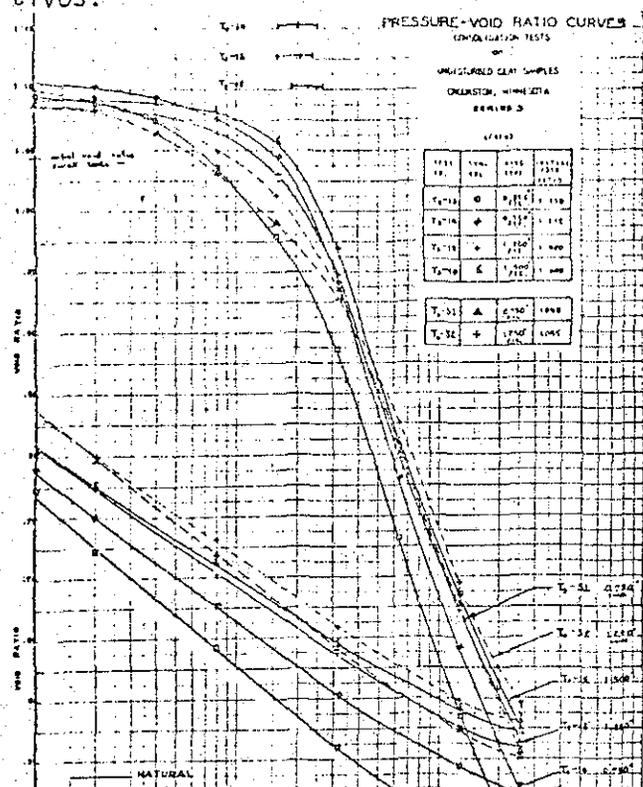
Las curvas de compresibilidad obtenidas, reportan una variación en la rama inicial de compresión, pero en la rama virgen coinciden tanto en forma como en localización.

De lo anterior, el autor llegó a la conclusión de que es poco importante la influencia de la expansión en las propiedades de compresibilidad de estos suelos.

Como comentario, la anterior conclusión es válida en la rama virgen de la curva de compresibilidad (Esfuerzos mayores de  $\sigma_b$ ); pero para el tramo de recompresión, donde se reportan variaciones, ya no es válida y es precisamente en el rango de esfuerzos que interesan en Mecánica de Suelos.

No se reportan las propiedades índices del suelo analizado, con el fin de poder correlacionar los diferentes tipos y cantidades de minerales activos de arcilla presentes en la muestra de suelo con las diferentes curvas de compresibilidad obtenidos, (ver gráficas II.1), y poder visualizar

así la influencia del fenómeno de hinchamiento en las propiedades de compresibilidad del suelo. Como ya se dijo, dicho fenómeno está relacionado directamente con el contenido de minerales de arcilla activos.



Gráfica II.1  
Curvas de compresibilidad obtenidas por Van Zelst.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

II.2 ELOISA ESTHER REY A.

"Variación de los parámetros de resistencia con la humedad y el confinamiento de un suelo expansivo".

Tesis UNAM - 1982 - REY.

La autora con el fin de conocer la variación de las propiedades de resistencia el esfuerzo cortante de un suelo expansivo con la hidratación, -- realizó pruebas de resistencia en la cámara triaxial. Se analizaron muestras inalteradas de suelo provenientes de Ciudad Obregón, Sonora, las cuales contienen minerales de arcilla típicos de montmorilonita.

Menciona que uno de los factores más importantes en las arcillas expansi

vas es la variación de humedad, la cuál va acompañada de cambios volumétricos cuyo valor está relacionado directamente con la capacidad de hidratación de los minerales de arcilla.

De los resultados obtenidos en pruebas realizadas para diferentes grados de saturación y diferentes esfuerzos de confinamiento, la autora concluye que los suelos expansivos cuando no se encuentran confinados al entrar en contacto con el agua se expanden debido al efecto físico-químico de los minerales activos perdiendo totalmente su cohesión (Experimentalmente se observó que estos suelos en agua y sin confinamiento reaccionaban rápidamente y se desintegraban por la pérdida de cohesión). Concluye también que al aumentar la hidratación del material el ángulo de fricción disminuye considerablemente y también la cohesión. (Para %S entre el 50 - 70%,  $\phi = 70^\circ$  y  $c = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ ; Para %S = 90%,  $\phi = 23^\circ$  y  $c = 0.2 \text{ Kg/cm}^2$ ).

Se puede observar la disminución tan fuerte de los parámetros de resistencia con el incremento del %S, viéndose afectada la capacidad de carga del material.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO III

### Fundamento Teórico

#### III.1 Conceptos Básicos

Cuando extraemos una muestra de suelo, se reduce la  $P = 0$  considerando la fórmula fundamental de la Mecánica de Suelos, tenemos:

$$P = \sigma + U$$

Sí  $P = 0 \rightarrow -U_{cap} = \sigma_{cap}$  III.1

La expresión III.1 nos indica que el efecto capilar está reteniendo el hinchamiento de la probeta, el agua de los poros está a tensión y por dicha tensión, se ejerce un esfuerzo de compresión sobre la estructura del suelo. Al liberar dicho efecto capilar (cuando se inunda la probeta), se descomprime el suelo, y tenemos como consecuencia la expansión de la probeta. Podemos distinguir dos componentes en éste fenómeno de expansión:

1. Absorción de agua debida a la potencia capilar remanente  $\rightarrow E$  (E = respuesta elástica).

2. Adsorción de agua debida a la presencia de minerales activos  
→ S.  
( S = hinchamiento),

La suma de éstos dos efectos, nos da el cambio volumétrico de la probeta.

$$\Delta \xi_V = \Delta \xi_e + \Delta \xi_s$$

$\Delta \xi_e$  = Incremento de la deformación volumétrica debida a la respuesta elástica.

$\Delta \xi_s$  = Incremento de la deformación volumétrica debida a la presencia de minerales activos.

- Cuando una muestra de suelo es extraida del campo, donde el nuevo estado de esfuerzos será:  $U_{cap} = \sigma_{cap}$ ; se le permite la absorción de agua, estamos liberando el esfuerzo capilar, por lo tanto, se reduce a la tensión en el agua, lo que provoca lo consecuente descompresión del suelo, es decir, se reduce también el  $\sigma_{cap}$ ; implica una reducción en los esfuerzos -- efectivos y viene la expansión debida a la respuesta elástica.

- Una muestra de arcilla con minerales activos como la montmorillonita y la illita, al adsorver agua se hinchan; debido a dicha adsorción, el material se reblandece y se incrementa su compresibilidad, por lo que no es deseable la presencia del hinchamiento en la probeta, al efectuar una prueba de consolidación.

- En suelos arcillosos que contienen minerales de arcilla activos, el alivio de esfuerzos efectivos permite la entrada de moléculas de agua a la estructura del mineral de arcilla, produciéndose el hinchamiento del suelo. (Expansión S). La expansión S se presenta cuando la estructura de suelo se alivia

de esfuerzos efectivos y es una función lenta del tiempo, que puede estar implícita con la expansión a largo plazo,

- Para evitar el hinchamiento, debemos conocer la tensión capilar remanente del suelo y traducir dicha tensión en una carga adicional inicial sobre la muestra.
- La potencia capilar varía con el tipo de suelo. Una arcilla tiene mayor potencia capilar que un limo. El hinchamiento está relacionado directamente con el contenido de minerales activos de arcilla, también con el contenido de agua natural y el estado de esfuerzos a que ésta sometida la muestra en el campo.
- La tensión capilar remanente del suelo, es la energía potencial intrínseca almacenada que posee el material, cuando manteniendo invariable el estado de esfuerzos para  $P = 0$ , se libera al iniciar la inundación de la probeta, produciendo el hinchamiento de la misma.
- La P.C.R. también dependerá del esfuerzo vertical efectivo a que éste sometida la muestra en el campo. A mayor valor del esfuerzo vertical efectivo mayor debe ser el P.C.R. de la muestra.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

III.2 Teoría para determinar el  $e_0$  y  $S_0$  en campo.

$e_0$  = Oquedad de campo.

$S_0$  = Grado de saturación en el campo.

Cuando se extrae una muestra de suelo, la muestra ésta confinada en el muestreador, no se le permite la absorción de agua, es decir, el contenido de agua se puede suponer que no varía, es el mismo que la muestra tiene in situ; por lo tanto, el contenido de agua que se obtiene en el laboratorio inmediatamente después de extraer la muestra, es el mismo que la muestra tiene en capo ( $\omega$  %).

Además,  $S_s$  (peso específico de sólidos), es también invariante para cada muestra de suelo.

Sea  $\beta = \omega' \cdot S_s$

III.2

Para la teoría expuesta anteriormente,  $\beta$  será una constante para cada muestra de suelo.

De acuerdo a las relaciones volumétricas y gravimétricas, tenemos que:

$\omega' \cdot S_s = e_0 \cdot S_0 = \beta$

III.3

donde:  $\omega'$  = Contenido de agua en la muestra } Valores que se pueden determinar en el laboratorio.  
 $S_s$  = Peso específico de sólidos }

$e_0$  = Oquedad en el campo. }

$S_0$  = Grado de Saturación en el campo. }

Valores a determinar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De lo anterior, deducimos que  $\beta$  es una constante muy importante de determinar en el laboratorio.

donde  $\beta = \frac{e_1 \cdot S_1}{\dots}$  III.4

$e_1$  = Oquedad en el Laboratorio

Siendo:

$S_1$  = Grado de saturación de laboratorio.

Los sedimentos finos como la arcilla, arcilla limosa y limo arcilloso se encuentran en ambientes lacustres de compresibilidad media y alta, los cuales se comportan con gran plasticidad y viscosidad intergranular durante la compresión.

Los poros del suelo y el agua de poro de los sedimentos finos lacustres contienen gas orgánico y dióxido de carbono, a causa de la descomposición de la materia orgánica. El contenido de gas en el suelo, puede encontrarse en los poros y también en solución en el agua de poro bajo la presión hidrostática existente. La acción bacteriana en éstos suelos, produce gas orgánico en forma de burbujas en los poros de suelo, las muestras inalteradas de éste tipo de suelo nunca se presentan con 100 % de saturación en laboratorio.

Supongamos que a la profundidad  $Z$ , los poros de suelo contienen un pequeño volumen de gas  $V_b$ , y en el agua de poro un volumen de gas en solución  $V_a$  bajo la presión  $(P_a + U)$ , donde  $P_a$  es la presión atmosférica y  $U$  es la presión hidrostática existente en el agua de poro.

Al reducirse la presión del agua en  $\Delta U$ , debido a un alivio de esfuerzos efectivos, se incrementa el volumen de gas en los poros y el gas disuelto, en el agua de poro, decrecerá bajo la presión  $(P_a + U - \Delta U)$ .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A una temperatura constante, la ley de Boyle - Mariotte - Henry. se puede escribir como:

$$(V_1 + \alpha V_w) P_1 = V_2 \cdot P_2 = \text{cte.} \quad \text{III.5}$$

Siendo  $\alpha = 0.0187$  coeficiente para el aire a  $20^\circ\text{C}$  y a  $1.033 \text{ Kg/cm}^2$   
 $V_w =$  Volumen de agua contenida en los poros de suelo.

$$\underset{1}{(V_b + \alpha V_w)} \underset{2}{(P_a + U)} = \underset{3}{(V_b + \Delta V_b + \alpha V_w)} \underset{4}{(P_a + U - \Delta U)} \quad \text{III.6}$$

- 1 Volumen de gas en los poros del suelo.
- 2 Volumen de gas en el agua de poro
- 3 Presión existente
- 4 Incremento en el contenido de gas en los poros, debido a una disminución en la presión  $\Delta U$ .

El cambio en el volumen de gas a causa del cambio en la presión hidráulica  $\Delta U$ , puede expresarse:

$$\Delta V_b = \frac{\Delta U}{P_a + U + \Delta U} (V_b + \alpha V_w) \quad \text{III.7}$$

A causa del incremento en el volumen de gas, se impone una deformación volumétrica a la estructura del suelo, la cuál se puede definir por:

$$\Delta \xi V_a = \frac{\Delta V_b}{V} \quad \text{III.8}$$

Siendo  $V =$  Volumen total del suelo

$\Delta V_b =$  Incremento de volumen de gas en los poros.

Es muy importante tener en cuenta que en el momento de reducir la presión de agua a la que ésta sometida la muestra in situ, se está incrementando el contenido de gas en los poros, es decir, la muestra se expande, sin que esta expansión implique un cambio en el contenido de agua; originándose un cambio en la oquedad del suelo. La oquedad de laboratorio será diferente a la oquedad natural →

$$e_1 \neq e_0$$

Por dicho cambio de oquedad debida al contenido de gas en los poros, debemos determinar la deformación volumétrica inducida en la estructura del suelo:

$$\rightarrow \Delta \xi V_a = \frac{e_1 - e_0}{1 + e_0}$$

$$\text{De III.8} \rightarrow \Delta \xi_a = \frac{\Delta V_b}{V}$$

$$\text{De III.7} \rightarrow \frac{e_1 - e_0}{1 + e_0} = \Delta \xi V_a = \frac{\Delta U}{P_a + U - \Delta U} \left( \frac{V_b}{V} + \alpha \frac{V_\omega}{V} \right) \quad \text{III.9}$$

Donde:

$$\Delta U = U_0 - \text{pot. capilar} = \text{Cambio en la presión hidráulica que causa un cambio en el volumen de gas.}$$

$$\frac{V_b}{V} = n (1 - \% S_0) \quad \text{Suelo parcialmente saturado.}$$

$$\frac{V_\omega}{V} = \% S.n$$

Donde  $n$  y  $\% S_0$  son la porosidad y el grado de saturación inicial del suelo, en condición in situ.

Podemos expresar a  $n = \frac{e_0}{1 + e_0}$

De III.3  $\rightarrow e_0 \cdot S_0 = \beta \rightarrow S_0 = \frac{\beta}{e_0}$

Reemplazando todos los valores en III.9, tenemos:

$$\frac{e_1 - e_0}{1 + e_0} = \frac{U - \text{pot. capilar}}{Pa + \text{pot. capilar}} \cdot \left\{ n(1 - S_0) + \alpha n S_0 \right\} \quad \text{III.10}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_A$

Sea  $A = \frac{U - \text{pot. capilar}}{U + \text{pot. capilar}}$

$$e_1 - e_0 = A \left\{ \frac{e_0}{1+e_0} \left( 1 - \frac{\beta}{e_0} \right) + \alpha \cdot \frac{e_0}{1+e_0} \cdot \frac{\beta}{e_0} \right\}$$

$$e_1 - e_0 = A \{ (e_0 - \beta) + \alpha \beta \}$$

$$e_1 - e_0 = A e_0 - A \beta + A \alpha \beta$$

$$A e_0 + e_0 = e_1 + A \beta - A \alpha \beta$$

$$e_0 (A + 1) = e_1 + A \beta (1 - \alpha)$$

$$e_0 = \frac{e_1 + A \beta (1 - \alpha)}{(A + 1)} \quad \text{III.11}$$

Donde =  $e_0$  = oquedad inicial en el campo.

$e_1$  = oquedad en el laboratorio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$A = \frac{U - \text{pot. capilar}}{p_a + \text{pot. capilar}} \quad U = \text{presión hidráulica en campo}$$

$p_a = \text{presión atmosférica}$

$$\beta = \text{cte} \rightarrow \beta = \omega' \cdot S_s = e_0 \cdot S_0$$

$$\% \quad S_0 = \frac{\beta}{e_0}$$

III.12

De III.11 y III.12 vemos como si conocemos la potencia capilar remanente de un suelo, podemos determinar en base a parámetros obtenidos en laboratorio, tanto la oquedad como el grado de saturación en el campo.

$$\text{De acuerdo a III.8} \quad \rightarrow \quad \Delta \xi V_a = \frac{e_1 - e_0}{1 + e_0}$$

Podremos determinar el coeficiente de expansión volumétrica unitaria de gas.

$$M_{Va} = \frac{\Delta \xi V_a}{\Delta U} = \frac{\Delta \xi V_a}{U - \text{pot. capilar}}$$

Vemos que  $M_{Va}$  es también una función del cambio de la presión del agua  $\Delta U$ .

## CAPITULO IV

Investigación de Laboratorio.

En esta investigación, el reconocimiento y la evaluación de la potencia capilar remanente de muestras inalteradas de suelo del Valle de México, se hará mediante pruebas directas. El propósito de este estudio es encontrar las características del comportamiento físico de este fenómeno de hinchamiento que presentan los suelos en el momento de inundarse, - pues con ello, estamos liberando la energía intrínseca que posee el material, cuando manteniendo la muestra de un estado de esfuerzos tal que  $P = 0$  y en condiciones naturales de contenido de agua, se produce una variación en el volumen, debido a lo que hemos llamado Potencia Capilar Remanente del Suelo. Por dicha expansión, se esta cambiando - las características mecánicas del material de su estado natural.

Se busca también evidenciar la energía potencial generadora del trabajo de expansión.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### IV. 1 Clasificación del Material Utilizado.

En esta investigación, se hicieron tres pruebas en suelos provenientes del Valle de México. Las propiedades índices del suelo se determinaron de acuerdo a el Manual de Laboratorio de Mecánica de Suelos. D.E.P.F.I. (curso 445108).

Un resumen de las propiedades índices de cada muestra aparecen registradas en la Tabla (IV.6.1, Pag.30). Las propiedades índices que fueron determinadas:

- a. Contenido de agua ( $\omega$  %)
- b. Grado de Saturación (S %)
- c. Relación de Vacíos (e)
- d. Gravedad específica (Ss)
- e. Peso específico ( $\gamma$  m)
- f. Límites de consistencia (L.L,L.P.)
- g. Consistencia Natural(qu)

#### IV. 2 Equipo

En las pruebas de potencial capilar remanente bajo volumen constante, se utilizó:

- . Consolidómetro de brazo rectilíneo (fig. IV.1) Pag.
- . Anillo calibrado para cargas.

- Micrómetro de 0.001 mm. de precisión.
- Balanza, horno, seguetas, cuchillos, espátulas, recipientes varios.

Este consolidómetro está diseñado para registrar la P. C. R., del material durante la realización de la prueba.

Con esta prueba se persigue obtener la respuesta elástica remanente del suelo, sometido a un esfuerzo vertical nulo, manteniendo constante el volumen de la muestra. El suelo posee una energía potencial que en el momento de liberarse, se utiliza para provocar la expansión. Al inundar la muestra se libera la tensión capilar del suelo → la muestra se expande.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### IV. 3. Procedimiento

Con el fin de obtener la potencia capilar remanente de un suelo, se efectuaron pruebas en el consolidómetro de brazo rectilíneo. Definiremos entonces la potencia capilar remanente de un suelo como "La medida en kilogramos en el anillo de carga del hinchamiento y la respuesta elástica remanente, cuando está el suelo liberando su energía potencial almacenada activada por la inundación de la probeta"

Durante el proceso de prueba, se usará la siguiente nomenclatura:

- Ms : Lecturas registradas en el micrómetro de deformación cuya apreciación esta en micras. Este es el mecanismo indicador del cambio de volumen que se produce al inundar la probeta.
- Mp : Registros de cargas leídos en el micrómetro del anillo de carga. Cuantifica la respuesta del suelo cuando se efectúa la inundación, a la vez que se conserva constante el volumen.

El procedimiento para efectuar la prueba fué:

- a. Se labró una probeta de suelo al cuál se le deseaba determinar la potencia capilar remanente. Dicha probeta tendrá las dimensiones y características de una probeta para una prueba de consolidación.
- b. Teniendo ya labrada la probeta en el anillo correspondiente, se montó el sistema anillo-piedra porosa-placa de carga en la casuela de consolidómetro de brazo rectilíneo, se hizo coincidir bien centradamente el balón de la placa de carga con el sistema de aplicación de carga a la probeta.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- c. Se niveló el brazo de consolidómetro y se ajustó el tornillo marcado con el No. tres en la fig. IV.1 pag. 28 al anillo de carga Mp. Se anotaron los registros iniciales de Mp y M $\delta$ .
- d. Se inició la inundación de la probeta, por este efecto, la muestra tiende a hincharse. Como se hicieron pruebas a volumen constante, donde se impide la expansión de la probeta, controlando las lecturas en el M $\delta$  para que no varíen; para lo cual se empleó el tornillo de ajuste No. tres al anillo de carga. Se registraron entonces nuevas lecturas en Mp; pero se mantuvo M $\delta$  invariable con un margen de  $\pm 5 \mu$ . o menor.
- e. Se grafican lecturas de carga Mp con respecto al tiempo, manteniendo el volumen constante, evitando así que la probeta absorva agua.
- f. El proceso se detuvo cuando se observó que comenzaba un relajamiento de la potencia capilar remanente pero se mantuvo el volumen constante; y se liberó toda la energía almacenada.
- g. El valor máximo de Mp mide la P. C. R. para el nivel de esfuerzos al que se realizó la prueba, es decir, para P = 0.

El valor de la P. C. R., será fundamental para aplicarla como carga adicional al portapesas, para evitar el efecto del hinchamiento, el cuál produce un reblandecimiento de la muestra, debida a la absorción del agua; con el consecuente aumento de la compresibilidad del suelo.

#### IV. 4. Calibración del Equipo.

IV.4.1 Nivelar el brazo de palanca. Uso del contrapeso.

4.2 Obtención de la relación del brazo de palanca, para conocer la relación entre la carga aplicada en el portapesas y la aplicada en la probeta.

$$\rightarrow \text{Relación de brazo de Palanca} = 14.56$$

4.3 Curva de calibración por deformación:

Colocando cargas en el portapesas, leemos las deformaciones que se obtienen, teniendo dentro de la casuela donde va la muestra un sistema formado por:

- . 2 piedras porosas.
- . Placa de carga con el balín.

Con lo que se obtiene la gráfica IV. 1 (pag.29) y podemos conocer la deformación del aparato.

Según calibración  $\rightarrow Q = 14.56 P$

P = carga portapesas.

Q = carga sobre la muestra.

Tabla IV.2. Relación Carga Portapesas - Esfuerzo sobre la Probeta.

P	$\sigma_v \left( \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$	$\sigma_v$ acumulado
0.25	0.075	0.075
0.40	0.120	0.195
0.50	0.150	0.350
0.80	0.24	0.540
1.0	0.30	0.885
1.6	0.48	1.365
2.0	0.60	1.965
3.2	0.96	2.925
6.4	1.92	4.845
12.6	3.78	8.625

IV.5 Labrado de la Probeta.

- a. Teniendo el tubo que contiene la muestra a ensayar, lo cortamos una longitud igual al doble de la altura de la probeta. Extraemos la muestra del tubo, separándolo con una broca delgada a lo largo de toda la periferia.
- b. Después de haber extraído la muestra, anotamos sus características, color, estratigrafía, fisuras etc. Determinamos el contenido de agua.
- c. Para definir el volumen de material donde se va a labrar la pastilla, medimos en dirección vertical una distancia de vez y me-dia al espesor del anillo de consolidación. En la parte supe-rior, demarcamos el área del anillo. Se procede entonces a se-parar el volumen señalado a través de líneas demarcatorias que lo definen, utilizando una hoja de sequeta. → Tendremos la --pastilla labrada de una manera burda.
- d. Sobre el torno de labrado, colocamos el anillo y encima el ma-terial. En la parte superior colocamos un vidrio plano y se comienza a labrar circularmente el contorno de la pastilla, utili-zando para esto el ranudor. Cada vez que el avance del labrado circular lo amerite, presionamos cuidadosamente la muestra para que entre en el anillo. Dicha presión se aplica sobre el vidrio que protege la muestra.
- e. Cuando el material haya penetrado lo suficiente dentro del anillo, se coloca debajo un anillo adicional de las mismas características para que el avance de la pastilla no se detenga.
- f. Cuando se ha garantizado el cubrimiento total de la altura del anillo con la muestra, procedemos a cortar las partes sobrantes tanto en la cara superior como en la inferior. Por último, pro-

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

cedemos al enrase de las caras, procurando el menor volumen amasado posible. Esto se logra dando un máximo de dos pasadas con el enrasador. Dicho enrasador debe ser una regla rígida que garantice bordes parejos en el anillo.

- g. Después de tener la muestra labrada en el anillo, inmediatamente colocamos las piedras porosas superior e inferior y lo presionamos levemente. Ya estamos listos para el montaje de la prueba.

#### IV. 6 Resultados obtenidos

##### Registro de observaciones de laboratorio Tablas y Gráficas

Las pruebas para medir la potencia capilar remanente de un suelo, se realizaron en un consolidómetro unidimensional de brazo de palanca rectilíneo. El procedimiento para efectuar la prueba, se explicó detalladamente en la sección IV. 3.

En esta sección, se consignan los registros de carga de expansión vs. -- tiempo, en los cuales aparecen las siguientes nomenclaturas:

M<sub>S</sub> : corresponde a las lecturas registradas por el micrómetro de deformación cuya apreciación esta en micras( $\mu$ )

$\Delta L$  : Es la diferencia de lecturas con respecto a la lectura inicial de M<sub>S</sub>. La tolerancia es de  $\pm 2\mu$ .

M<sub>p</sub> : corresponde a los registros de carga leídos en el micrómetro del anillo de carga. Cuantifica la respuesta del suelo cuando se está efectuando la inundación, a la vez que se mantiene el volumen constante.

$\Delta M_p$ : es la diferencia de lecturas con respecto a la lectura del micrómetro antes de iniciarse la saturación del material.

"La carga de potencia capilar remanente es la medida en kilogramos en el anillo de carga, de la respuesta del suelo cuando se está liberando su energía almacenada activada por la inundación de la probeta".

Esta carga se obtiene al multiplicar  $\Delta M_p$  máximo por la constante de calibración del anillo de carga. Esta constante tiene un valor de

$$K = 2.45 \cdot 10^{-2} \text{ Kg./división.}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para determinar la carga sobre la muestra, habrá que multiplicar la carga obtenida en el anillo por 10, debido a que la relación de palanca entre el anillo registrador de carga y la aplicación de la carga sobre la muestra es de 1:10.

Se efectuaron tres pruebas de P. C. R. sobre muestras de suelo inalteradas provenientes del Valle de México.

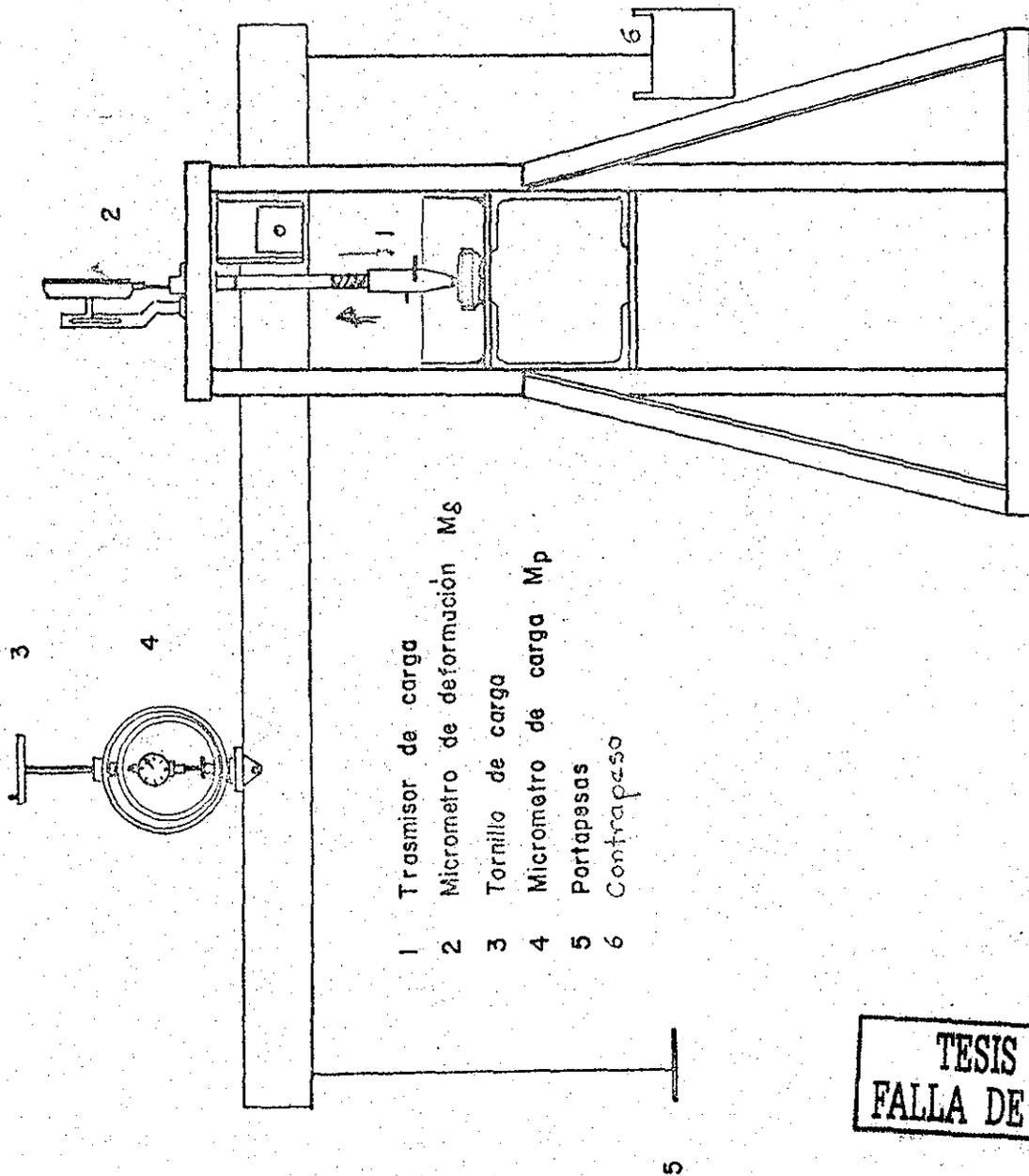
A continuación, se consignan los registros y las gráficas correspondientes a c/u de las pruebas.

En la pag. No. 38 se encuentra la tabla IV.6.5 → Resumen de los resultados correspondientes a este tipo de pruebas.

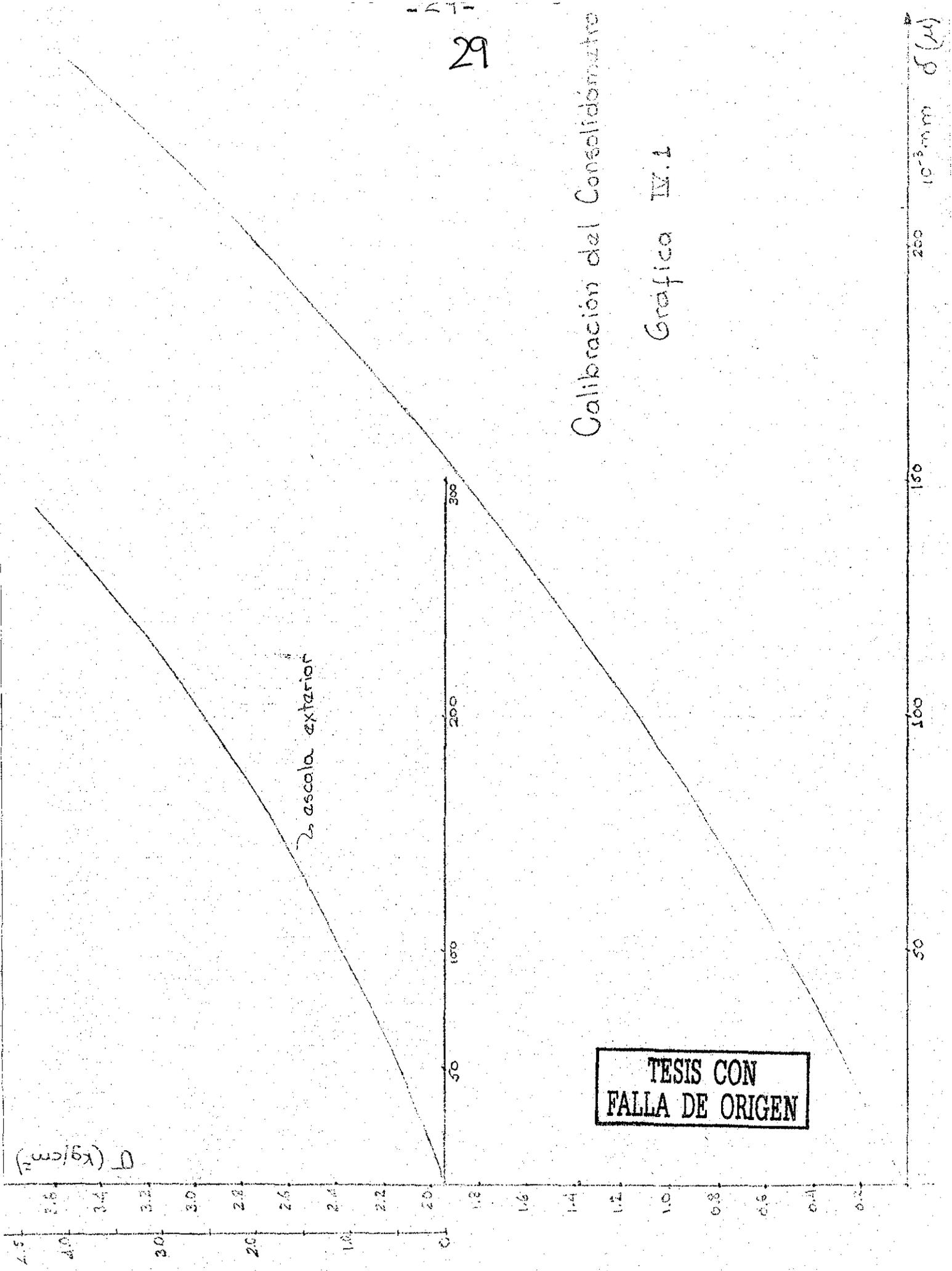
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CONSOLIDOMETRO DE PALANCA RECTILINEA

Figura IV.1



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Calibración del Consolidómetro

Gráfica IV.1

TABLA IV.6.1 Propiedades Indices del Material Analizado

		Prueba No. 1	Prueba No. 2	Prueba No. 3
Contenido de agua	$\omega(\%)$	276.73	295.42	236.46
Peso volumétrico	$\gamma_m(\text{ton}/\text{m}^3)$	1.126	1.263	1.176
Gravedad Específica	Ss	2.39	2.51	2.32
Relación de vacíos	e	6.78	7.57	5.67
Grado de Saturación	S(%)	97.5	98.	97
Consistencia Natural	$\gamma_{qu}(\text{Kg}/\text{cm}^2)$	1.40	1.32	1.75
Límite Líquido	L.L(%)	302.61	326.57	301.17
Límite Plástico	L.P(%)	99.72	106.81	93.26
Índice de Plasticidad	I.P.	202.89	219.77	207.91
Esfuerzo efectivo	$\sigma_v(\text{kg}/\text{cm})$	1.25	1.36	1.42

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tesis: Sonia Cristina Posada B.

Prueba N° 1

Arcilla Verdez Olivo

Prueba de P.C.R.  
bajo volumen constante

Prueba N° 1

Tabla IV.6.2.

Fecha	Tiempo transcurrido	Mó		M.D		Carga de P.C.R. ΔMp.k (Kg).
		Micrómetro de deformación lectura (μ)	Δl (μ)	Micrometro de carga lect (divisiones)	ΔMp (divis)	
2.10.84	h. 1/10 a.m.	80.0		0/1.00	0	
	1 minuto	83.0	± 3	1.00	0	
	2 "	80.5	0.5	1.50	0.5	
	3 "	85.0	5.0	1.80	0.8	
	4 "	80.2	0.2	2.00	1.0	
	5 "	83.7	3.7	2.40	1.4	
	6 "	80.0	-	2.50	1.5	
	7 "	80.0	-	2.70	1.7	
	8 "	82.0	2.0	3.00	2.0	
	9 "	80.7	0.7	3.25	2.25	
	10 "	80.0	-	3.50	2.50	
	11 "	80.8	-	3.50	2.50	
	12 "	80.0	-	3.70	2.70	
	13 "	81.5	1.5	3.90	2.90	
	14 "	80.0	-	4.10	3.10	
	15 "	80.9	0.9	4.25	3.25	
	30 "	80.2	0.2	6.20	5.20	
	1 hora	82.5	2.5	8.40	7.40	
	2 "	80.0	-	10.75	9.75	
	3 "	80.5	-	12.45	11.45	
	4 "	81.5	1.5	13.50	12.50	
	5 "	80.0	-	14.50	13.50	
	6 "	77.0	-3.0	15.00	14.00	
	24 "	70.2	-9.2	17.40	16.80	→ 16.8.K = 0.412 Kg.
	48 "	70.0	-9.0	16.00	15.00	
	72 "	70.0	-9.0	16.00	15.00	
	96 "	70.0	-9.0	16.00	15.00	

$$K = 2.45 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/división}$$

$$\text{Area} = 50.27 \text{ cm}^2$$

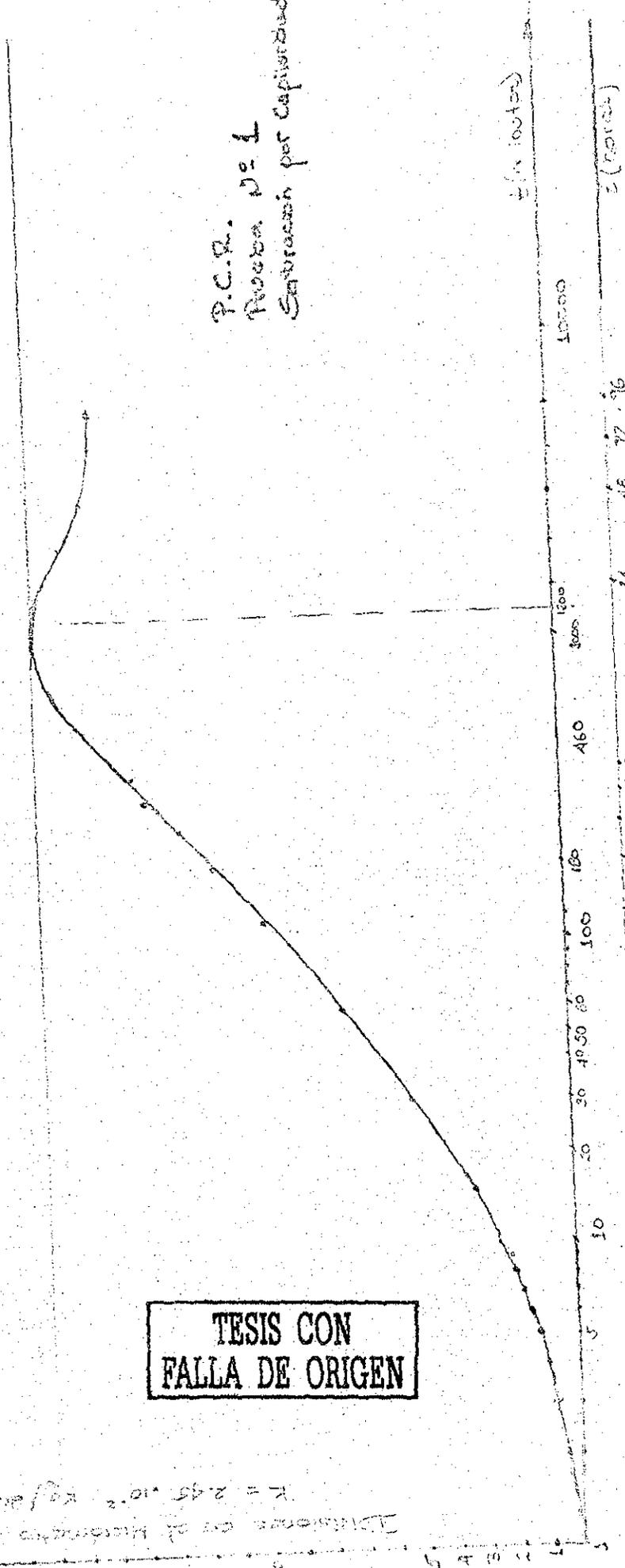
$$P.C.R. = \frac{\text{Carga} \cdot l_0}{\text{Area}} = \frac{0.0819 \text{ Kg}}{\text{cm}^2} = \frac{81.9 \text{ gr/cm}^2}{\text{cm}^2} = P.C.R.$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

P.C.R.  $N=1$   
Proceder  $N=1$   
Embrazón por Capacidad

Dimensiones en el momento de falla Nip  
 $K = 2.45 \cdot 10^2 \text{ Kg/din/cm}^2$



Gráfica IV-2 Carga de Expansión vs. tiempo.

Tesis: Sonia Cristina Posada B.

Prueba N° 2.

Arcillo. Rogiza

Prueba de P.C.R.  
bajo Volumen constante

Prueba N° 2.

Tabla IV. 6.3.

Fecha	Tiempo Transcurrido	M <sub>d</sub>		M.P.		Carga de P.C.R. ΔP. K (Kg)
		Micrometro de deformac lectura (μ)	ΔP (μ)	Micrometro de lectura (division)	Carga ΔP (divis)	
9.10.84	h: i / 10 am.	80/85	-	80/50	0	
	2 minutos	85	-	5.5	0.5	
	3		0.5	6.3	1.3	
	4		-	6.3	1.3	
	5		1.5	7.0	2.0	
	6		0.5	7.5	2.5	
	7	83	2.0	7.5	2.5	
	8		-	8.1	3.1	
	9		2.5	8.1	3.1	
	10		-	8.6	3.6	
	11	85	0.5	8.6	3.6	
	12		-	8.8	3.8	
	13		-	9.1	4.1	
	14	84.5	0.5	9.5	4.5	
	15		-	9.7	4.7	
	30		1.3	12.5	7.5	
	60	85.5	0.5	15.9	10.9	
	1 hora	87	2.0	20.5	15.5	
	2	85	-	23.8	17.8	
	3	82.5	3.5	24.2	19.2	
	4	85	-	24.8	19.8	→ 19.8 · K = 0.4851 Kg.
	5	84.5	0.5	24.5	19.5	
	6	85	-	22.0	18.0	
	24	83	2.0	21.5	17.0	
	48	83.5	2.5	21.7	16.7	
	72	84.0	1.0	21.5	16.5	
	96	84.5	0.5	21.5	16.5	
	120	84.5	0.5	21.5	16.5	

$$K = 2.45 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/división}$$

$$P.C.R. = \frac{\text{Carga} \cdot 10}{\text{Área}} = \frac{0.4851 \cdot 10}{50.27} = 0.0965 \text{ Kg/cm}^2 = 96.5 \text{ gr/cm}^2 = P.C.R.$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Tubo: Sosa Castra Posada B.

Proba U23

Acilla Verde-Olivo

Prova de P.C.R.  
baixo Volumen etc.

Proba U23

Tabela IV.5.4.

Fecha	Tiempo Transcurrido	M <sub>D</sub>		M <sub>P</sub>		Carga de P.C.R. AMP x K (%)
		Micrometro (mm)	ΔP (μ)	Micrometro (mm)	Carga (mm)	
16.10.84.	hora / 11 a.m	10/78	-	10/10	0	
	1 minuto	78	-	1.0	0	
	2	78.2	0.2	2.0	1.0	
	3	78.1	0.1	2.7	1.7	
	4	78.0	0.0	3.3	2.3	
	5	78.0	-	3.9	2.9	
	6	78.5	0.5	4.2	3.2	
	7	78.3	0.3	4.2	3.2	
	8	78.9	0.9	4.7	3.7	
	9	78.0	-	5.1	4.1	
	10	78.0	-	5.3	4.3	
	11	79.2	1.2	6.0	5.0	
	12	79.5	1.5	6.2	5.2	
	13	79.0	1.0	6.4	5.4	
	14	78.0	-	6.6	5.6	
	15	78.0	-	8.7	7.7	
	30	79.5	1.5	11.6	10.6	
	1 hora	79.9	1.9	15.3	14.3	
	2	78	1.5	17.8	16.8	
	3	79.6	11.6	19.6	18.6	
	4	80.0	2.0	20.5	19.5	
	5	78.2	1.8	21.3	20.3	
	6	79.7	1.7	26.3	25.3	→ 25.3 . K = 0.6199 Kg.
	24	71.2	3.2	25.7	24.7	
48	77.9	0.9	24.7	23.7		
72	78	-	24.5	23.5		
96	79.2	0.2	24.8	23.8		

$K = 2.45 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/división}$

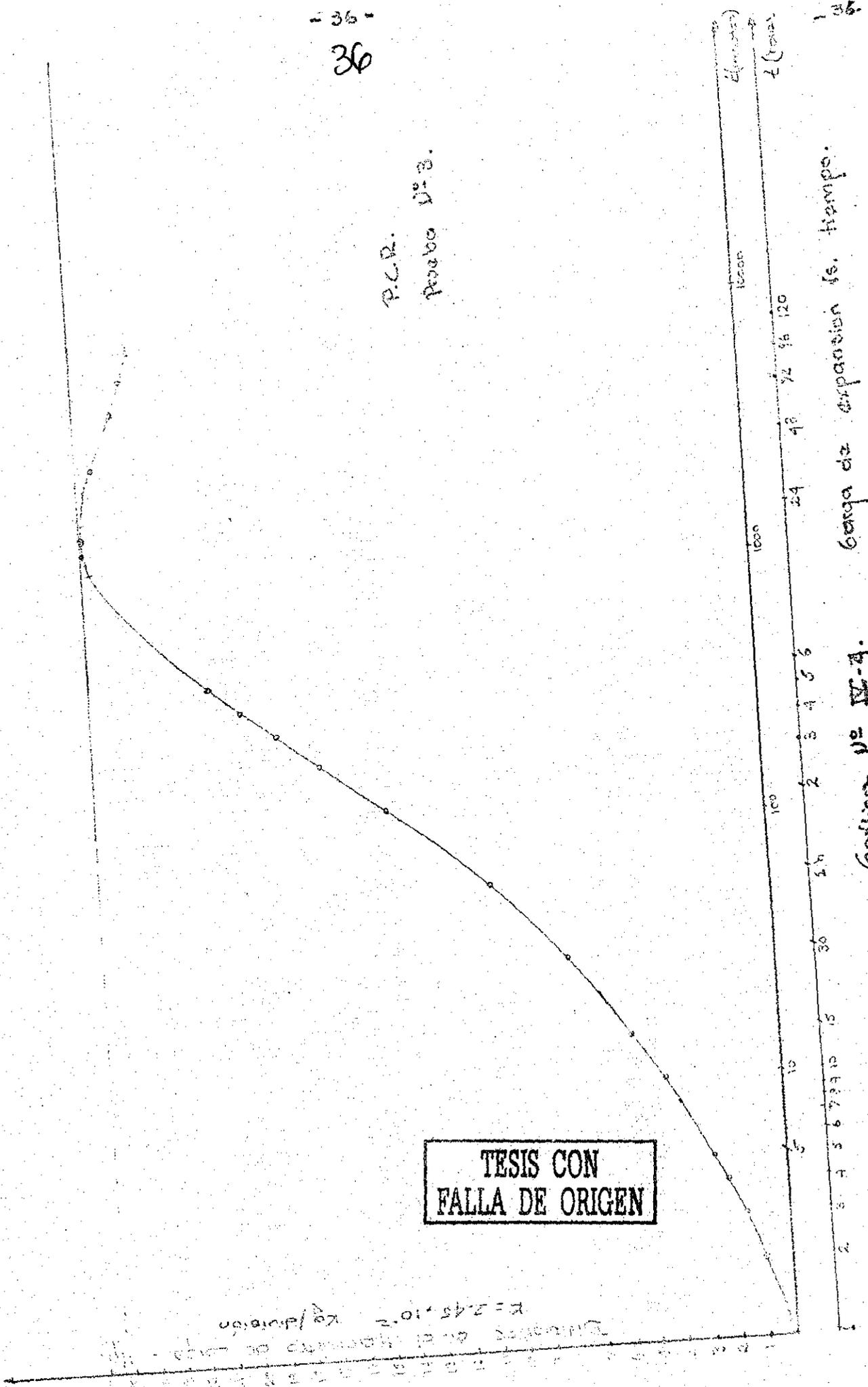
$\text{Area} = 50.27 \text{ cm}^2$

$$P.C.R = \frac{\text{Carga} \cdot 10}{\text{Area}} = \frac{0.6199 \cdot 10}{50.27} = 0.12331 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 123.31 \frac{\text{gf}}{\text{cm}^2} = \text{PCR}$$

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

36

P.C.R.  
Prueba N° 3.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Carga N° III-4.

Carga de expansión (s. tiempo).

Dimensiones del material de carga  
 $\epsilon = 2.45 \cdot 10^{-2}$   
Carga de expansión

TABLA IV.6.5

Resumen de Resultados de las Pruebas de Potencia Capilar

Remanente a Volumen Constante

Prueba	Lectura en Mp. divisiones	K Const. del anillo (Kg/divi) $\cdot 10^{-2}$	Carga de P. C. R. Kg. $\times 10$	Area de probeta (cm <sup>2</sup> )	P.C.R. gr/cm <sup>2</sup>
No.1	16.8	2.45	0.4116	50.27	81.88
No.2	19.8	2.45	0.4851	50.27	96.49
No.3	25.3	2.45	0.6199	50.27	123.31

Carga de Potencia Capilar Remanente = Mp.k

Potencia Capilar Remanente =  $\frac{\text{Carga} \cdot R_p}{\text{Area}}$

Rp = relación de palanca entre el anillo de carga y la probeta.  
(1 = 10).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO V

V.1 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, los cuales se consignan en la siguiente tabla, podemos concluir:

Prueba	$\omega(\%)$	$\gamma_m$ +/m <sup>3</sup>	Ss	e	%S	qu	L.L	L.P	I.P	P.C.R. gr/cm <sup>2</sup>	Tiempo res- puesta Máxi ma.
No.1	276.73	1.126	2.39	6.78	97.5	1.40	302.61	99.72	202.89	81.88	24 hrs.
No.2	295.42	1.263	2.51	7.57	98	1.32	326.58	106.81	219.77	96.77	5 hrs.
No.3	236.46	1.176	2.32	5.67	97	1.75	301.17	93.26	207.91	123.31	24 hrs.

1. Se evidenció el Potencial Capilar Remanente de los suelos estudiados, energía generadora del trabajo de expansión.

2. El valor del Potencial Capilar Remanente varía según el tipo de suelo analizado. Debido al poco número de pruebas realizadas, no se puede establecer una correlación más confiable entre las propiedades índices del material, el  $\sigma_v$  y su P.C.R.
3. El tiempo al cual se obtiene la respuesta máxima también es variable. De las pruebas realizadas, podemos concluir que transcurridas 24 hrs. desde el inicio de la inundación de la probeta, se obtiene la respuesta máxima; es decir, se ha disipado toda esa energía potencial que es generadora del trabajo de expansión. Después de este tiempo, se observa un relajamiento en la curva  $t$  vs.  $M_p$ . (ver gráficas Pag.37).

De acuerdo a lo expuesto en los capítulos anteriores, el fenómeno del hinchamiento, que está relacionado directamente con el tipo y cantidad de minerales activos de arcilla presentes en la muestra de suelo, y  $\sigma_v$  afectan las propiedades de compresibilidad del suelo; con lo que concluye que el momento de realizar una prueba de consolidación y con el conocimiento de la P.C.R. del suelo, dicho valor se debe traducir en una carga adicional inicial sobre la probeta, impidiendo de esta manera el hinchamiento del suelo. Esta carga inicial se debe dejar actuar sobre la probeta por 24 hrs. antes de iniciar la prueba de consolidación con el fin de lograr la estabilización del fenómeno de hinchamiento.

V.b Recomendaciones

Tomando en cuenta que en la presente investigación se evidenció la presencia del P.C.R. de los suelos analizados sería conveniente ampliar esta línea de trabajo, con lo que se propone:

1. P.C.R. vs. Propiedades índices del material

De acuerdo con la experiencia de esta investigación, aparentemente la P.C.R. está estrechamente ligada con las propiedades índices del material, especialmente el Índice de Plasticidad; por lo que sería interesante hacer un mayor número de pruebas de P.C.R. sobre diferentes materiales previamente clasificados, que permitan establecer una correlación entre el tipo de material, su  $\sigma_v$  con la P.C.R.

2. El efecto del hinchamiento en la compresibilidad del material

La variación de los parámetros de compresibilidad con el fenómeno de hinchamiento, es importante en problemas de deformación.

En la práctica, cuando se realiza una excavación, se produce un alivio de esfuerzos; si se permite la absorción de agua por el suelo, habrá una hidratación de los minerales de arcilla, produciéndose el hinchamiento del suelo que como se ha dicho, produce una variación en la compresibilidad (ver referencia No. 1); por lo que se tendrán mayores asentamientos.

Para esta investigación sería importante tener en cuenta:

- a) Emplear muestras inalteradas de materiales con diferentes propiedades índices cuidadosamente determinadas, y diferentes  $\sigma_v$
- b) Efectuar pruebas de consolidación paralelas sobre el mismo material, donde en una se permita la expansión; con el fin de comparar los parámetros de compresibilidad obtenidos y poder visua

lizar la influencia del hinchamiento en la compresibilidad del material.

3. Efecto del hinchamiento en las propiedades de resistencia del material.

De igual manera que en el inciso anterior, la variación de los parámetros de resistencia  $c$  y  $\phi$  con el fenómeno de hinchamiento, es importante en problemas de estabilidad. (ver referencia No.2). En este caso, sería interesante efectuar pruebas paralelas en la cámara triaxial y comparar los parámetros de resistencia obtenidos.

## REFERENCIAS

1. FREDDY EDILIO SANCHEZ NAVEDA  
"Estudio de un Suelo Expansivo de Coro, Venezuela"  
Tesis UNAM - 1979  
SAN.
  
2. ELOISA ESTHER REY ARMENTA.  
"Variación de los Parámetros de Resistencia con la  
Humedad y el confinamiento de un Suelo expansivo"  
Tesis UNAM. 1982  
REY.
  
3. THEODORE VAN, ZELST  
Proceedings of the second International Conference on Soil  
Mechanics and Foundation Engineering.  
Rotterdam 1948.  
"An Investigation of the factors affecting Laboratory  
Consolidation of Clay".  
Pag: 52 - 61.
  
4. LEONARDO ZEEVAERT W.  
"Descompresión en depósitos de Suelos Impermeables"  
Facultad de Ingeniería - D.E.P.F.I. - UNAM.  
1984.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN