

T-19

(288)

0215

S  
DES

01149

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES

140

APLICACION DE LA TEORIA DE LOS COEFICIENTES DE COMPRESIBILIDAD  $\beta'$  A LAS ARCILLAS DEL LAGO TEXCOCO.

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería.

P r e s e n t a :

Manuel Sierra Alvarado

Ciudad Universitaria

México, D. F.

Abril de 1975

**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.

CONTENIDO.

1.- Introducción.

2.- Determinación de los coeficientes  $\gamma$ ,  $\gamma'$  y  $\rho'$

3.- Resumen y conclusiones.

Apéndice I.- La prueba de consolidación estandar.

Apéndice II.- Relación entre los parámetros  $w_v$  y  $C_c$  y el coeficiente de compresibilidad  $\gamma$ .

Apéndice III.- Aplicación de las correlaciones entre el coeficiente  $\gamma$  y el límite líquido a las arcillas de otras ciudades.

Apéndice IV.- Expresión para el cálculo de asentamientos.

#### 1.- ANTECEDENTES.

En 1.965, el Dr. Juárez Badillo presentó un trabajo sobre la compresibilidad de los suelos (ref. 1), en donde expuso su teoría, que se desarrolla con dos coeficientes de compresibilidad: uno para la rama virgen y otro para tomar en cuenta la energía almacenada en la rama de expansión de la curva de consolidación.

En ese trabajo, propuse la ley siguiente:

$$\frac{dV}{V} = -\gamma \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (1)$$

donde considero que:

V es el volumen de una muestra de suelo que ha sido consolidada a una presión normal octaédrica (presión isotrópica).

$\sigma$  es mayor que la presión de preconsolidación, es decir, que se está en la rama virgen de la curva de consolidación.

$d\sigma$  es un incremento infinitesimal de la presión isotrópica.

$dV$  es el cambio infinitesimal de volumen correspondiente.

$\gamma$  es un parámetro adimensional.

Si  $V_0$  y  $\sigma_0$  son el volumen y la presión inicial, respectivamente, integrando la ecuación 1 se obtiene:

$$V = V_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma} \quad (2)$$

De manera similar, considerando que el incremento de volumen  $\Delta V = V - V_0$ , la ecuación 2 puede escribirse en la forma siguiente:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma} - 1 \quad (3)$$

Se observa que: para  $\gamma = 0$ , se tendría una arcilla incompresible, mientras que: para  $\gamma = 1$ , la ecuación 2 es la correspondiente a la ecuación de estado de un gas perfecto, a temperatura constante (ref. 2). Como una arcilla no es incompresible ni es tan compresible como un gas, se deduce que:

$$0 < \gamma < 1 \quad (3)$$

Entonces el coeficiente  $\gamma$  es el "coeficiente de compresibilidad" de la arcilla.

Para la rama de expansión de la curva de consolidación,

propuso - el Dr. Juárez Badillo - el siguiente razonamiento: si la cantidad  $dV/V$  se modificó según el valor  $d\sigma/\sigma$  regulado por el coeficiente  $\gamma$ , al descargar en  $d\sigma/\sigma$  sigue gobernando  $\gamma$ , pero no toda la cantidad  $d\sigma/\sigma$  será "efectiva", sino que solo una parte de  $d\sigma/\sigma$  usará el suelo para expandirse y el resto lo "ahorrará" o "guardará" la arcilla. Llamando  $\rho(d\sigma/\sigma)$  a la parte usada para cambio volumétrico, se puede escribir:

$$\frac{dV}{V} = -\gamma\rho \frac{d\sigma}{\sigma} = -\gamma_p \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (4)$$

Si  $V_0$  y  $\sigma_0$  son el volumen y la presión inicial, respectivamente, integrando la ecuación 4 se obtiene:

$$V = V_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma_p} \quad (5)$$

Análogamente, la ecuación 5 puede escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma_p} - 1 \quad (6)$$

$$\text{do donde} \quad \gamma_p = \gamma\rho \quad (7)$$

Entonces el coeficiente  $\gamma_p$  es el "coeficiente de expansión" de la arcilla; coeficiente que es el producto del coeficiente de compresibilidad  $\gamma$  por la relación  $\rho$  de la arcilla.

La ecuación 4 puede escribirse también así:

$$\frac{dV}{V} = -\gamma\rho \frac{d\sigma}{\sigma} = -\gamma \frac{d\sigma_e}{\sigma_e} \quad (8)$$

donde:

$\sigma_e$  es la "presión equivalente", sobre la rama virgen de la curva de consolidación isotrópica pa

ra un volumen  $V$ , que realmente esta "contando" para los cambios volumétricos.

$$\frac{d\sigma_e}{\sigma_e} = \rho \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (9)$$

Integrando la ecuación 8 para condiciones iniciales  $V_0$  y  $\sigma_{e0}$ , se obtiene:

$$V = V_0 \left( \frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} \right)^{-\gamma} \quad (10)$$

Igualmente, integrando la ecuación 9 para condiciones iniciales  $\sigma_{e0}$  y  $\sigma_0$ , se obtiene:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\rho \quad (11)$$

Substituyendo la ec. 11 en la ec. 10, se obtiene:

$$V = V_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma\rho} = V_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma_p} \quad (12)$$

De lo anterior, y de la ecuación 7, se deduce una relación importante entre  $\gamma$  y  $\gamma_p$ , que es:

$$\rho = \frac{\gamma_p}{\gamma} \quad (13)$$

Se observa que  $\rho$  es la relación de pendientes de las tangentes a las ramas de expansión y compresibilidad en el punto común a ambas, que varía entre 0 y 1; cuando  $\rho = 0$ , la rama de expansión será una línea horizontal, y cuando  $\rho = 1$ , las dos ramas coincidirán. En estos casos se tiene, respectivamente, un suelo "plástico perfecto" y un suelo "elástico perfecto", bajo la acción de esfuerzos isotrópicos.

Las ideas anteriores condujeron, al Dr. Juárez Badillo,

a pensar que cuando la muestra de arcilla está en la rama de descarga de la curva de compresibilidad y tiene un volumen  $V_c$ , con un esfuerzo de consolidación  $\sigma_o$  (fig. 1), el esfuerzo "real" que está actuando sobre las partículas no es  $\sigma_c$  sino  $\sigma_e$ , entonces:

$$\sigma_e = \sigma_c + (\sigma_o - \sigma_c) = \sigma_c + \sigma_s \quad (14)$$

donde:

$\sigma_s$  es el esfuerzo "almacenado" por la arcilla.



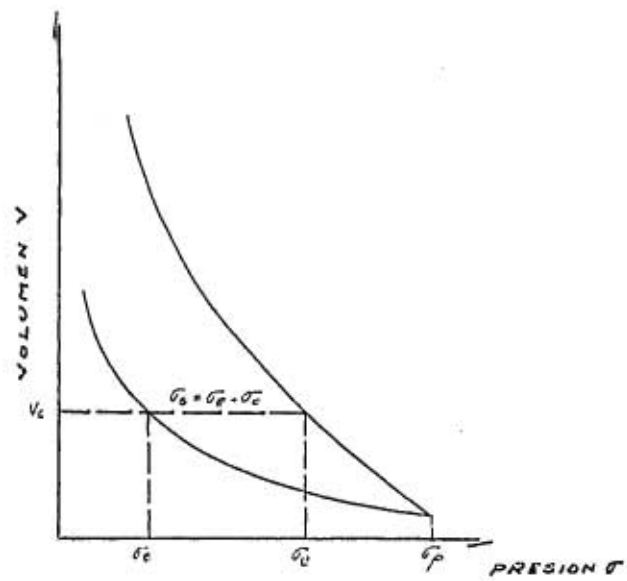


Fig. 1.- Definición de diferentes presiones isotrópicas.

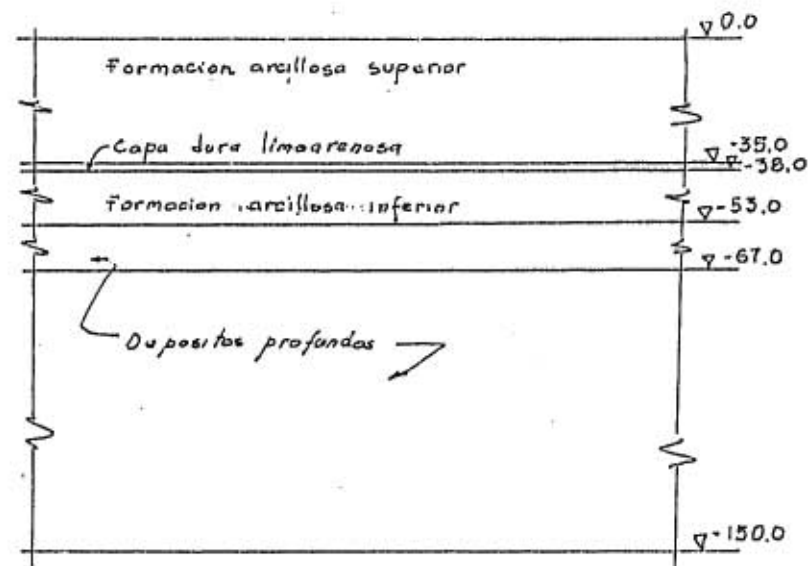


Fig. 2.- Corte estratigráfico del subsuelo del Lago Texcoco.

2.- DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES DE COMPRESIBILIDAD Y DE EXPANSION, Y DE LA RELACION EXPANSION-COMPRESIBILIDAD.

2.1.- Información utilizada.

Los datos obtenidos de los sondeos BNP-1, BNP-2 y BNP-3, que se realizaron durante las investigaciones efectuadas para el Plan Texcoco, sirvieron de base para este trabajo (ref. 3), los mismos que fueron proporcionados, gentilmente, por el Dr. Raúl J. Marsal. Además, en la fig. 2 se presenta un corte esquemático de la estratigrafía superior del Lago Texcoco (ref. 4).

2.2.- Cálculo de los coeficientes  $\gamma$ ,  $\gamma_p$  y  $\rho$ .

Si una muestra de arcilla de volumen inicial  $V_0$  tiene una relación de vacíos inicial  $e_0$  y después de incrementarlo la presión tiene un volumen  $V$  con relación de vacíos  $e$ , se obtiene:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1 + e}{1 + e_0} \quad (15)$$

Entonces las ecuaciones 2 y 5 pueden escribirse de la forma siguiente:

$$\frac{1 + e}{1 + e_0} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma} \quad (16)$$

$$\frac{1 + e}{1 + e_0} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma_p} \quad (17)$$

Por tanto:

$$\gamma = \frac{\text{Log}\left(\frac{1+e}{1+e_0}\right)}{\text{Log}\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)} \quad (18)$$

$$\gamma_p = \frac{\text{Log}\left(\frac{1+e}{1+e_0}\right)}{\text{Log}\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)} \quad (19)$$

donde, en la práctica resulta conveniente que:

$\sigma_0$  = máxima presión aplicada a la muestra de suelo.

$\sigma$  = para la compresibilidad: presión en la rama virgen de la curva de consolidación más alejada de la presión  $\sigma_0$ .

para la expansión: presión en la rama de expansión de la curva de consolidación más alejada de la presión  $\sigma_0$ .

$e_0$  = mínima razón de vacíos, correspondiente a  $\sigma_0$ .

$e$  = razón de vacíos, correspondiente a  $\sigma$ .

Como los datos, de la información utilizada, corresponden a pruebas de consolidación estandar, y la teoría de los coeficientes de compresibilidad y expansión fué desarrollada para consolidación isotrópica. En el presente trabajo se ha convenido designar como:

$\gamma$  = coeficiente de compresibilidad.

$\gamma_p$  = coeficiente de expansión.

$\rho'$  = relación de expansión-compresibilidad.

de acuerdo con lo que se demuestra en el apéndice I.

Los valores de  $\sigma_0$ ,  $\sigma$ ,  $e_0$  y  $e$  se obtuvieron de las cur

vas de consolidación correspondientes. En la tabla 1, se --  
 presentan los valores usados para el cálculo y los obtenidos  
 para los coeficientes  $\delta$ ,  $\delta_p'$  y  $\rho'$ , que se determinaron con --  
 base en las ecuaciones 13, 18 y 19.

A fin de facilitar el cálculo de los coeficientes  $\delta$  y  $\delta_p'$ ,  
 y prescindir del empleo de las ecuaciones 18 y 19 se elaboró,  
 posteriormente, una gráfica (fig. 3) mediante la cual se pue  
 de determinar el valor de los coeficientes  $\delta$  y  $\delta_p'$  en función  
 de los siguientes parámetros:  $V/V_0 = (1 + e)/(1 + e_0)$  y  $C_0/\sigma$ .

En la fig. 4, se muestran los valores de los coeficien  
 tes  $\delta$ ,  $\delta_p'$  y  $\rho'$ , en función de la profundidad.

### 2.3.- Comparación de los puntos teóricos con los experimenta los.-

Se puede deducir que la utilidad de la teoría de los --  
 coeficientes de compresibilidad consiste en generalizar los  
 valores de dichos coeficientes para suelos cuya estratigra--  
 fía ha sido debidamente estudiada; de aquí que, del análisis  
 de los valores presentados en la fig. 4, se puede establecer  
 valores medios de los coeficientes  $\delta$ ,  $\delta_p'$  y  $\rho'$ , y así mismo  
 presentar, en la tabla 3, una tentativa de estratificación --  
 de la parte superior del subsuelo del Lago Texcoco en fun--  
 ción de las características de compresibilidad.

Tabla 3.- Estratigrafía tentativa (sondeos BNP-1, 2 y 3)

Profundidad	$\delta$	$\delta_p'$	$\rho'$
0.0 - 35.0	0.40	0.032	0.08
38.0 - 53.0	0.40	0.032	0.08
53.0 - 67.0	0.25	0.020	0.08
67.0 - 83.0	0.35	0.028	0.08
93.0 - 150.0	0.25	0.020	0.08

A fin de visualizar mejor la aproximación de los puntos determinados teóricamente, en base a los valores medios de los coeficientes  $\gamma'$  y  $\gamma'_p$ , respecto de los puntos experimentales de las curvas, en las figuras 5 (a, b, c, d, e y f), se presentan algunas de las curvas de consolidación en las cuales se comparan los puntos teóricos con los experimentales. Analizando dichas figuras se observa que la mayoría de los puntos teóricos están, relativamente, cerca de los puntos experimentales.

#### 2.4.- Correlación entre el coeficiente $\gamma'$ y la relación de vacíos $e'_g$ y las propiedades índice.

En la tabla 2, se presentan los valores correspondientes al límite líquido, índice plástico, coeficiente  $\gamma'$ , coeficiente  $\gamma'_p$ , relación  $\rho'$  y razón de vacíos  $e'_g$ , en función de la profundidad para cada uno de los sondeos utilizados.

De acuerdo con los datos de la tabla 2, se dibujaron -- las figuras 6 y 7, que muestran la correlación entre el límite líquido y el índice plástico en función del coeficiente y en función de la relación de vacíos  $e'_g$ , correspondiente a la presión de 8 Kg/cm<sup>2</sup>.

Del análisis de las figuras mencionadas se deduce que:

- 1) El coeficiente  $\gamma'$  tiene la tendencia a crecer con el límite líquido, mientras que el índice plástico, parece, no mantiene relación aparente con dicho coeficiente.
- 2) La relación de vacíos  $e'_g$  tiene la tendencia a aumentar con el límite líquido, mientras que el índice plástico, parece, no mantiene relación aparente con dicha relación de vacíos.

Con base en las deducciones anteriores, se procedió a correlacionar el coeficiente  $\gamma$  y la relación de vacíos  $c'_j$  con el límite líquido, respectivamente; así mismo, se procedió a establecer una correlación entre el coeficiente  $\gamma$  y la relación de vacíos  $c'_j$ , que se presentan en las figuras 8, 9 y 10 en su orden.

Del análisis de las figuras se dedujo que:

- Para la correlación entre el coeficiente  $\gamma$  y el límite líquido.

1) Se puede establecer dos envolventes, superior e inferior, entre las cuales quedan comprendidos del 90% a 95% de los puntos.

2) Estas envolventes están expresadas por las ecuaciones:

$$\text{(superior)} \quad \gamma = 0.0024 (LL - 10) \quad (20)$$

$$\text{(inferior)} \quad \gamma = 0.0011 (LL - 10) \quad (21)$$

3) El valor medio se estableció con una proporción de  $\pm 1.5\sigma$  con respecto a las envolventes mencionadas, con lo que se determinó una tendencia media, que es la que mejor se adaptó a los puntos, expresada por la ecuación:

$$\gamma = 0.0016 (LL - 10) \quad (22)$$

- Para la correlación entre la relación de vacíos  $c'_j$  y el límite líquido, análogamente, se dedujo que:

1) Se puede establecer dos envolventes, superior e inferior, entre las cuales quedan comprendidos del 90% a 95% de los puntos.

2) Estas envolventes están expresadas por las ecuaciones:

$$\text{(superior)} \quad c'_0 = 0.013 (LL - 10) \quad (23)$$

$$\text{(inferior)} \quad c'_0 = 0.008 (LL - 10) \quad (24)$$

3) El valor medio se estableció, de manera similar, con una proporción de  $\pm 1.50$  con respecto a las envolventes mencionadas, con lo que se determinó una tendencia media que es la que mejor se adaptó a los puntos, expresada por la ecuación:

$$c'_0 = 0.012 (LL - 10) \quad (25)$$

- Finalmente, para la correlación entre el coeficiente  $\delta'$  y la relación de vacíos  $c'_0$ , se dedujo que:

1) Se puede establecer dos envolventes, superior e inferior, entre las cuales queden comprendidos del 90% a 95% de los puntos.

2) Estas envolventes están expresadas por las ecuaciones:

$$\text{(superior)} \quad c'_0 = 11 \delta' \quad (26)$$

$$\text{(inferior)} \quad c'_0 = 5 \delta' \quad (27)$$

3) El valor medio se estableció, de manera similar, con una proporción de  $\pm 1.50$  con respecto a las envolventes mencionadas, con lo que se determinó una tendencia media que es la que mejor se adaptó a los puntos, expresada por la ecuación:

$$c'_0 = 7.5 \delta' \quad (28)$$

La tendencia media, además, se verificó analíticamente,

so conoce que:

$$\text{de la ec. 22} \quad (LL - 10) = \gamma / 0.0016$$

$$\text{de la ec. 25} \quad (LL - 10) = c_p' / 0.012$$

de donde:

$$c_p' = (0.012 / 0.0016) \gamma = 7.5 \gamma \quad (29)$$

Es necesario indicar que el punto, correspondiente al -  
vértice de las envolventes, expresadas por las ecuaciones 20  
21, 23 y 24, se determinó como (LL - 10) porque después de -  
analizar algunas alternativas se consideró que dicho punto -  
era el que mejor ajuste tenía, además según el Prof. A. Casu  
grande no se registran suelos con valores del límite líquido  
menores que el punto ologido.



Tabla 1.- Valores usados para calcular los coef.  $\gamma$ ,  $\gamma_p'$  y  $\rho'$

	prof. m.	$\sigma_0$	$e_0$	COMPRESION		EXPANSION		$\gamma$	$\gamma_p'$	$\rho'$
				$\sigma_c$	$e_c$	$\sigma_e$	$e_e$			
I	4.27	8.0	2.60	0.5	12.50	0.5	3.30	0.48	0.064	0.13
	8.67	8.0	2.30	1.0	6.20	0.5	2.80	0.33	0.051	0.13
	13.53	8.0	2.00	1.0	5.45	0.5	2.30	0.37	0.034	0.09
	16.60	8.0	3.70	1.0	9.45	0.5	4.20	0.38	0.037	0.10
	20.15	8.0	1.70	1.0	4.80	0.5	1.95	0.37	0.032	0.09
	25.20	8.0	2.90	1.0	7.60	0.5	3.40	0.35	0.044	0.11
	28.38	8.0	2.55	2.0	4.30	0.5	2.75	0.29	0.020	0.07
	32.88	8.0	3.00	2.0	6.00	0.5	3.30	0.40	0.026	0.06
	40.95	8.0	4.30	2.0	8.30	0.5	4.85	0.41	0.036	0.09
	44.35	8.0	4.30	4.0	4.20	0.5	3.20	0.45	0.036	0.08
	48.55	8.0	3.10	4.0	4.50	0.5	3.40	0.42	0.026	0.06
	52.65	8.0	2.38	6.0	3.66	0.5	3.50	0.56	0.045	0.08
	56.10	8.0	2.45	2.0	3.15	0.5	2.20	0.22	0.017	0.08
	62.49	8.0	2.23	4.0	3.08	1.0	2.33	0.34	0.015	0.04
	67.50	8.0	2.00	4.0	3.27	0.5	2.24	0.51	0.028	0.05
	71.75	8.0	2.40	4.0	3.70	0.5	2.71	0.47	0.032	0.07
	76.18	8.0	4.52	6.0	5.20	0.5	4.97	0.40	0.029	0.08
	79.16	16.0	1.46	4.0	3.20	0.5	1.76	0.39	0.042	0.11
102.72	16.0	1.24	8.0	1.46	0.5	1.34	0.14	0.019	0.14	
104.60	16.0	0.67	14.0	0.68	0.5	0.70	0.06	0.010	0.17	
148.57	16.0	1.82	8.0	2.11	1.0	1.95	0.15	0.022	0.15	
153.54	16.0	2.11	8.0	2.83	0.5	2.28	0.30	0.026	0.09	
159.53	16.0	1.95	10.0	2.57	0.5	2.12	0.41	0.016	0.04	
2	4.00	8.0	2.15	1.0	5.90	0.5	2.40	0.38	0.028	0.07
	8.00	8.0	3.00	1.0	8.85	0.5	3.55	0.43	0.047	0.11
	12.40	8.0	1.85	2.0	3.75	0.5	2.00	0.37	0.019	0.05
	16.10	8.0	3.10	2.0	5.60	0.5	3.30	0.34	0.017	0.05
	19.23	8.0	2.45	4.0	3.60	0.5	2.70	0.42	0.025	0.06
	23.48	8.0	3.45	2.0	7.05	0.5	3.90	0.47	0.035	0.07
	25.65	8.0	2.70	2.0	6.05	0.6	2.95	0.47	0.029	0.05
	31.30	8.0	2.40	4.0	3.60	0.5	2.65	0.49	0.026	0.06
	35.90	8.0	2.40	2.0	5.00	0.5	2.60	0.41	0.021	0.05
	38.30	8.0	1.65	2.0	2.90	0.5	1.85	0.28	0.026	0.09
	41.90	8.0	3.08	2.0	5.68	0.5	3.43	0.36	0.030	0.08



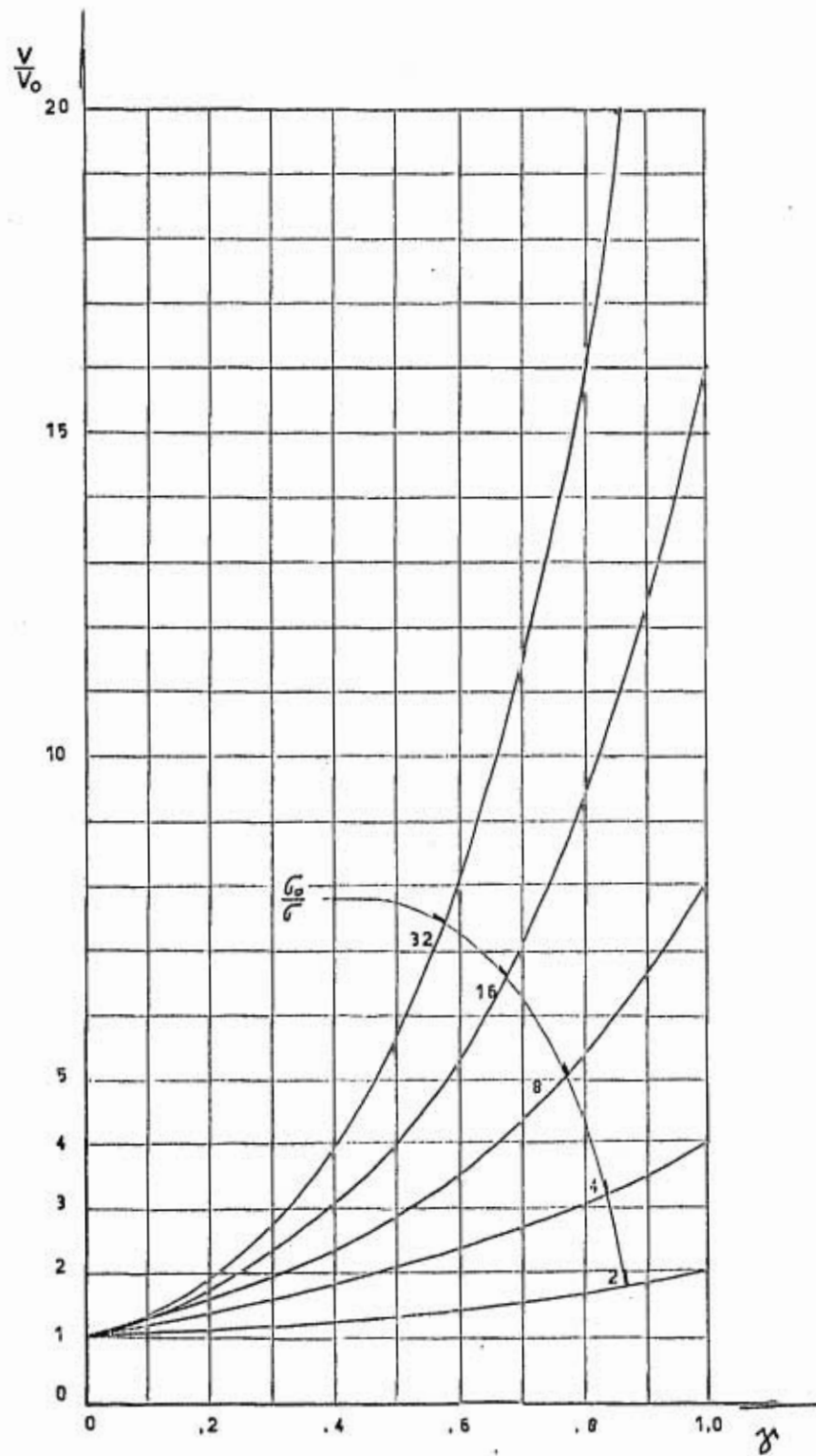


Figura 3. Gráfica para calcular el coeficiente de compresibilidad  $\gamma$  .

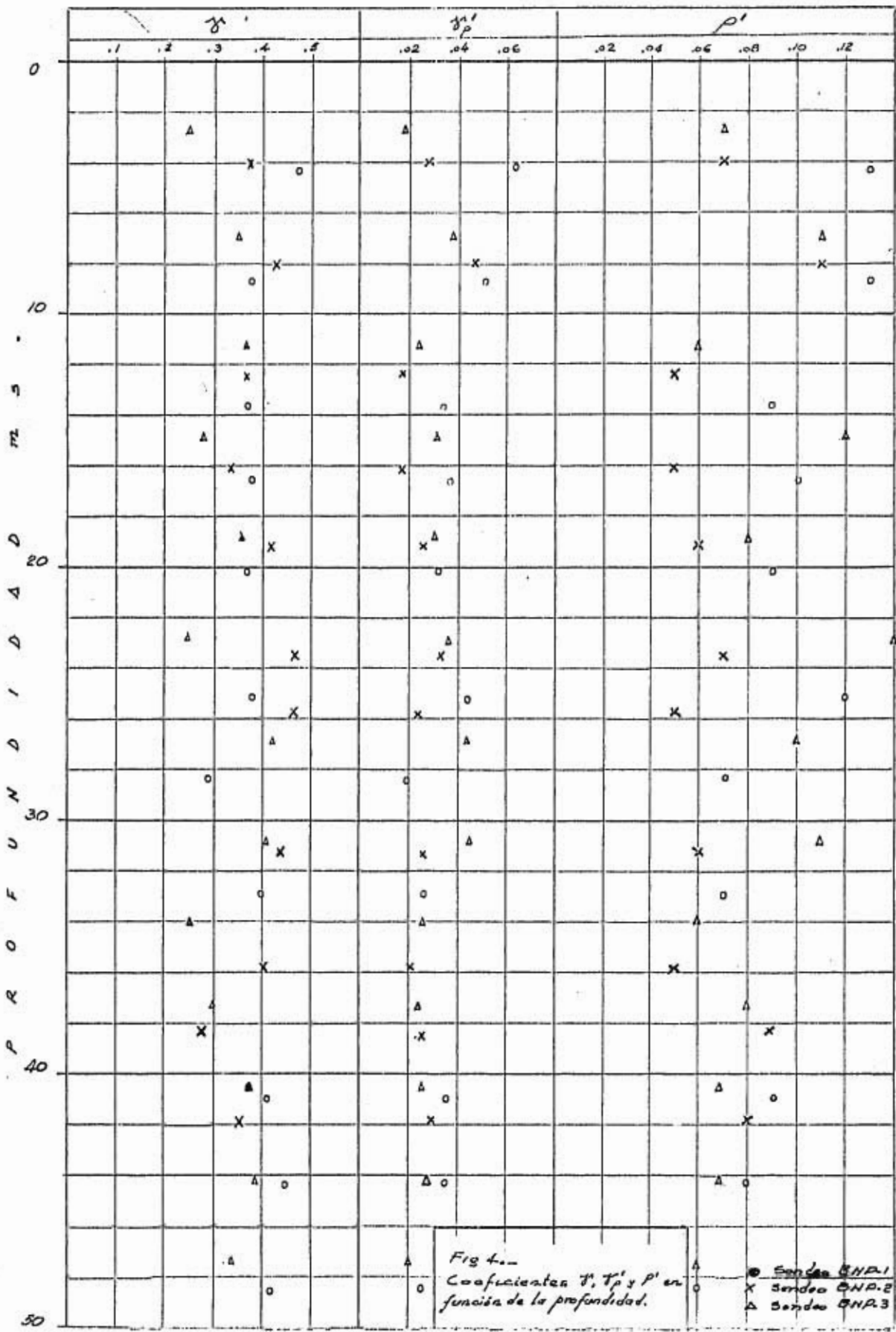
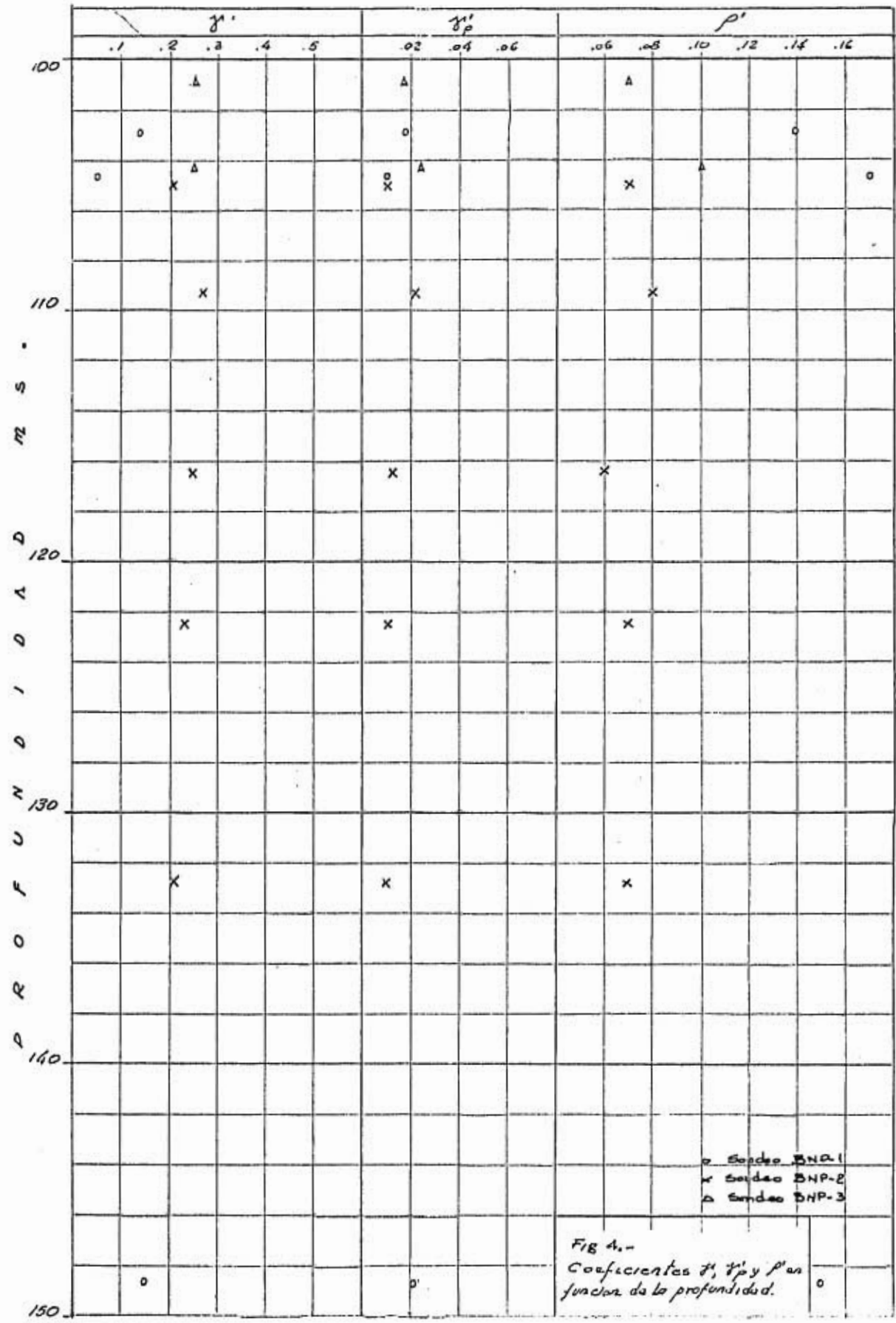


Fig 4.-  
 Coeficientes  $V$ ,  $T_p$  y  $P'$  en  
 función de la profundidad.

○ Sonda BNA.1  
 X Sonda BNA.2  
 Δ Sonda BNA.3





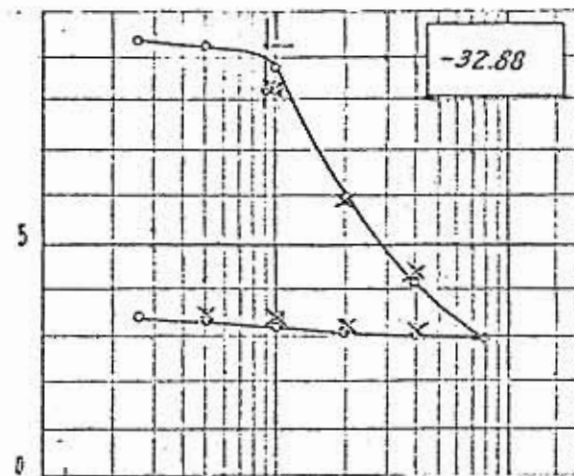
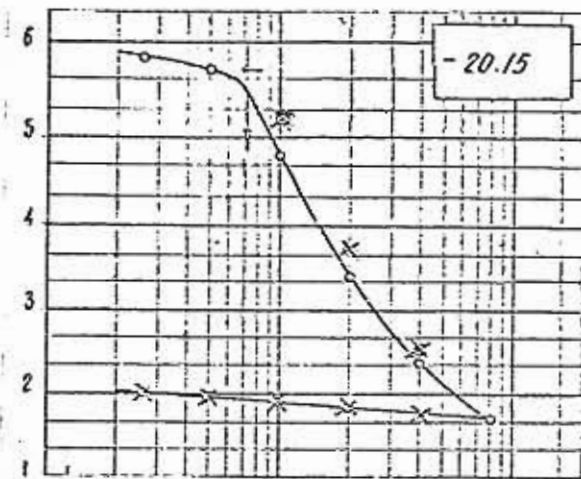
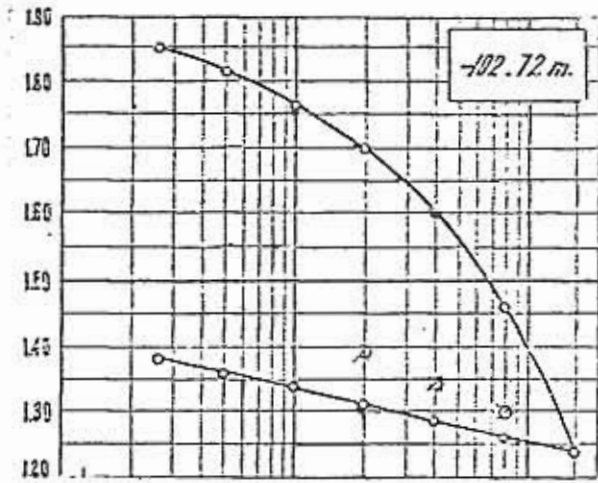
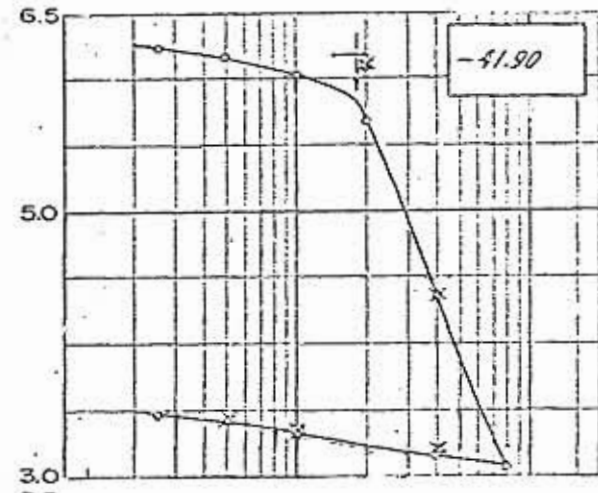
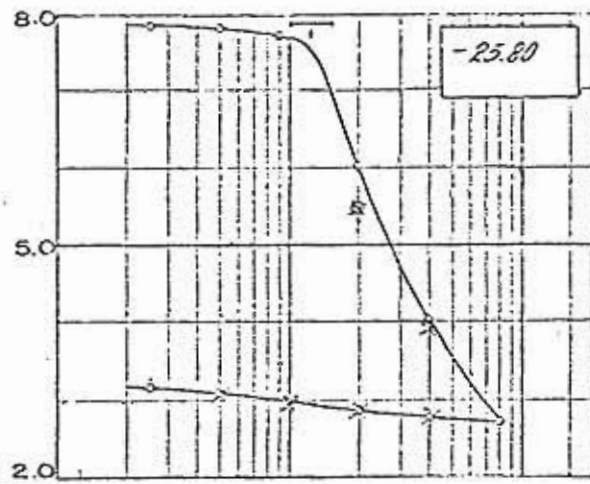


Fig. 5a. Curvas de consolidación (sondeo BNP-1). Comparación entre puntos teóricos y experimentales.



(a)



(b)

Fig. 5b. Curvas de consolidación (a: sondeo BNP-1, b: sondeo BNP-2). Comparación entre puntos teóricos y experimentales.



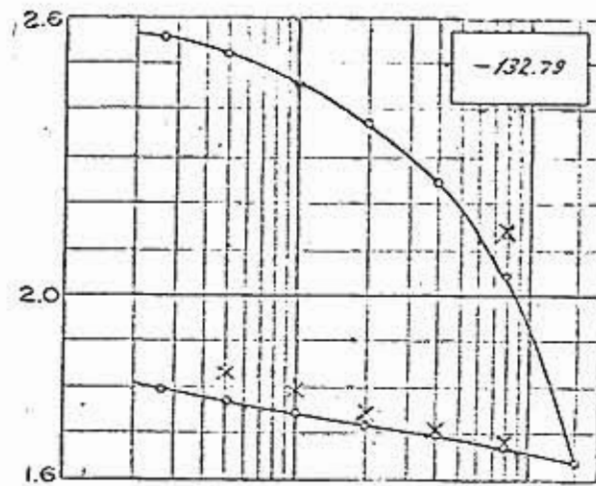
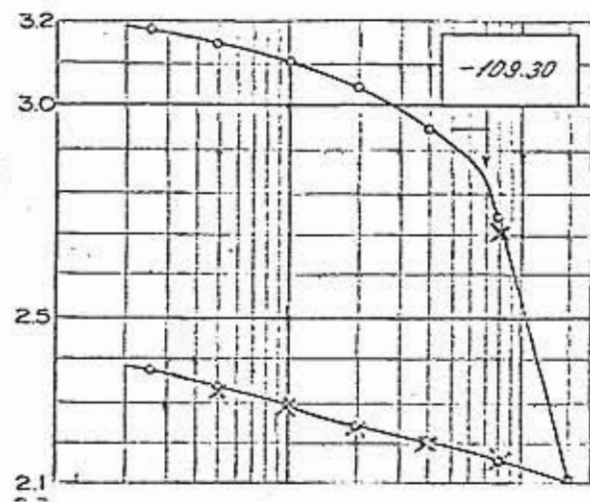
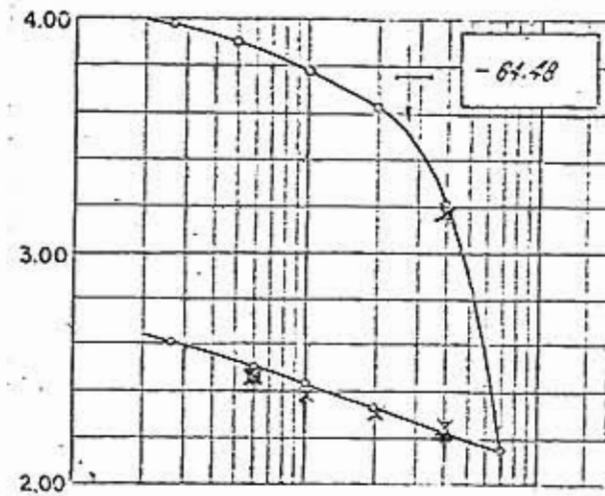
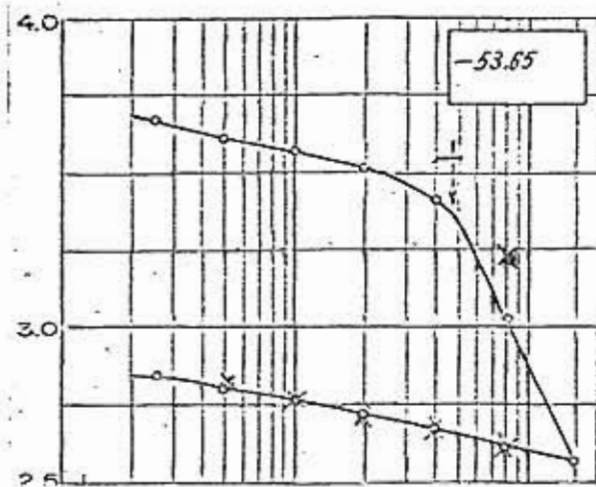


Fig. 5c. Curvas de consolidación (sondeo BNP-2). Comparación entre puntos teóricos y experimentales.

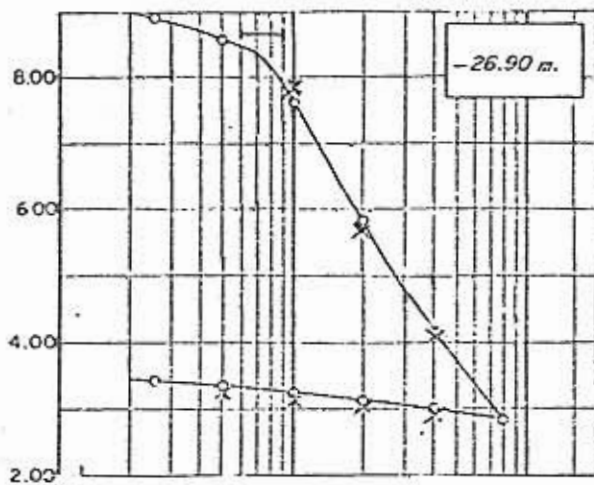
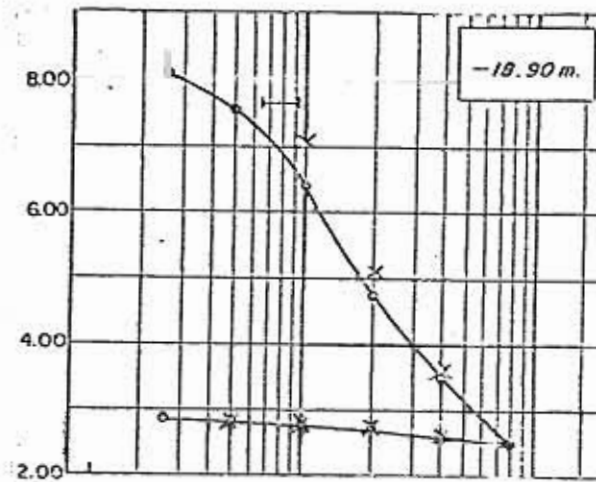
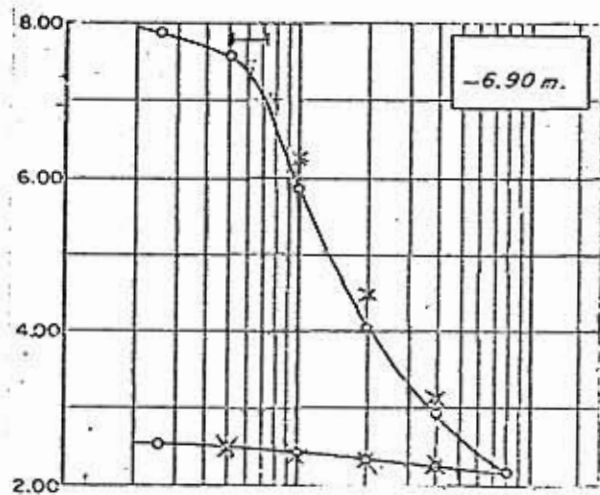


Fig. 5d. Curvas de consolidación (sondeo BNP-3). Comparación entre puntos teóricos y experimentales.

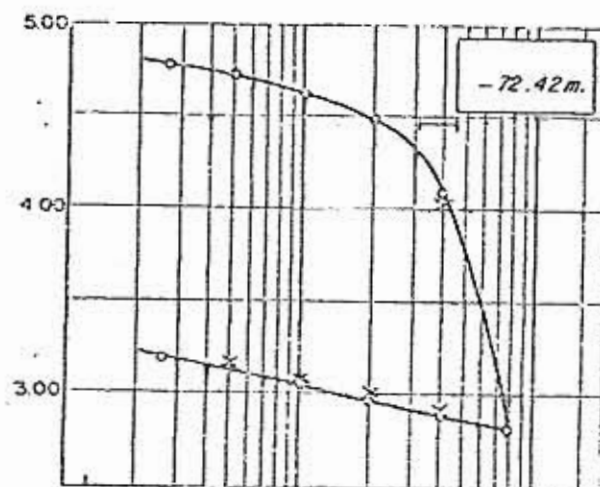
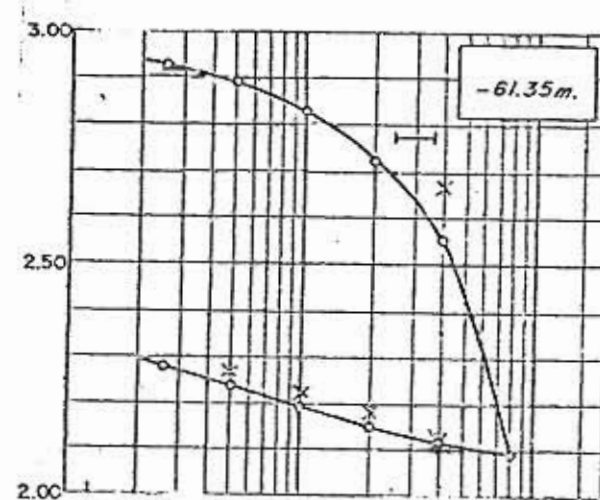
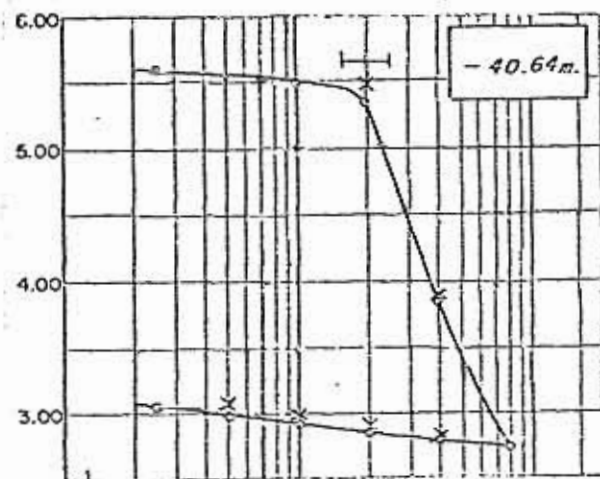


Fig. 5e. Curvas de consolidación (sondeo BNP-3). Comparación entre puntos teóricos y experimentales.

Tabla 2.- Propiedades compresibilidad arcillas lago Texcoco

	prof.	LL	IP		$e'_s$	$\gamma$	$\gamma'_p$	$\rho'$
SONDIO BNP1	4.27				2.6	0.48	0.064	0.13
	8.67	504.0	336.9		2.3	0.38	0.051	0.13
	13.05				2.0	0.37	0.034	0.09
	16.60	347.0	266.7		3.7	0.38	0.037	0.10
	20.15	294.0	210.5		1.7	0.37	0.032	0.09
	28.20	432.0	333.7		2.9	0.38	0.040	0.12
	28.88	292.0	167.3		2.68	0.29	0.020	0.07
	32.88	247.1	204.3		3.0	0.40	0.026	0.07
	40.90	224.6	145.3		4.3	0.41	0.036	0.09
	44.36	260.0	200.3		2.8	0.45	0.036	0.08
	48.65	278.5	206.5		3.1	0.42	0.026	0.06
	52.65	287.0	205.3		2.93	0.56	0.045	0.08
	56.10	120.7	64.0		2.05	0.22	0.017	0.08
	64.69	151.5	89.1		2.23	0.34	0.015	0.04
	67.50	197.4	136.0		2.0	0.51	0.020	0.05
	71.75	201.0	134.8		2.4	0.47	0.032	0.07
	76.18	322.3	232.1		4.62	0.40	0.028	0.07
	79.76	223.0	159.2		2.24	0.39	0.042	0.11
	102.72	119.8	66.9		1.46	0.14	0.019	0.14
	104.60	45.3	19.3		0.73	0.06	0.010	0.17
148.67	130.8	69.8		2.11	0.15	0.022	0.15	
153.54	166.2	90.8		2.83	0.30	0.026	0.09	
158.53	142.8	56.4		2.67	0.41	0.016	0.04	
SONDIO BNP2	4.00	316.8	254.3		2.15	0.30	0.023	0.07
	8.00	279.0	296.1		3.0	0.43	0.047	0.11
	12.40	246.0	186.4		1.85	0.37	0.013	0.05
	16.10	235.2	169.9		3.10	0.34	0.017	0.05
	19.23	275.4	218.8		2.65	0.42	0.025	0.06
	23.48	320.7	240.0		3.45	0.47	0.035	0.07
	25.80	251.0	193.3		2.70	0.47	0.024	0.05
	31.30	239.5	172.2		2.60	0.44	0.026	0.06
	35.30	269.1	195.1		2.40	0.41	0.021	0.05
	38.30	102.0	56.8		1.65	0.23	0.026	0.09
41.90	281.3	206.2		3.08	0.36	0.030	0.08	



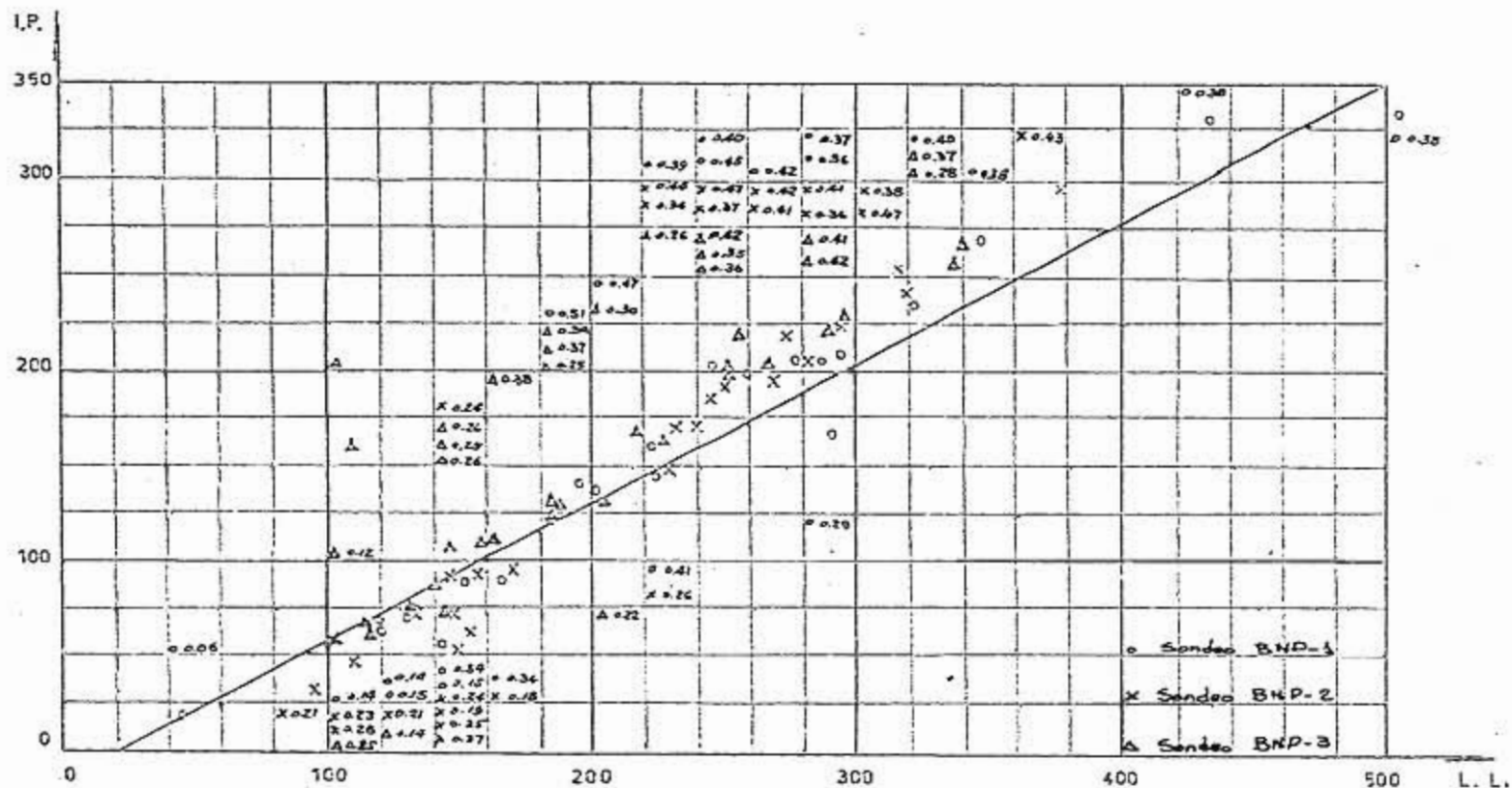


Figura 6. Carta de plasticidad (sondeos BNP-1, BNP-2, BNP-3) en función del coef.  $f$

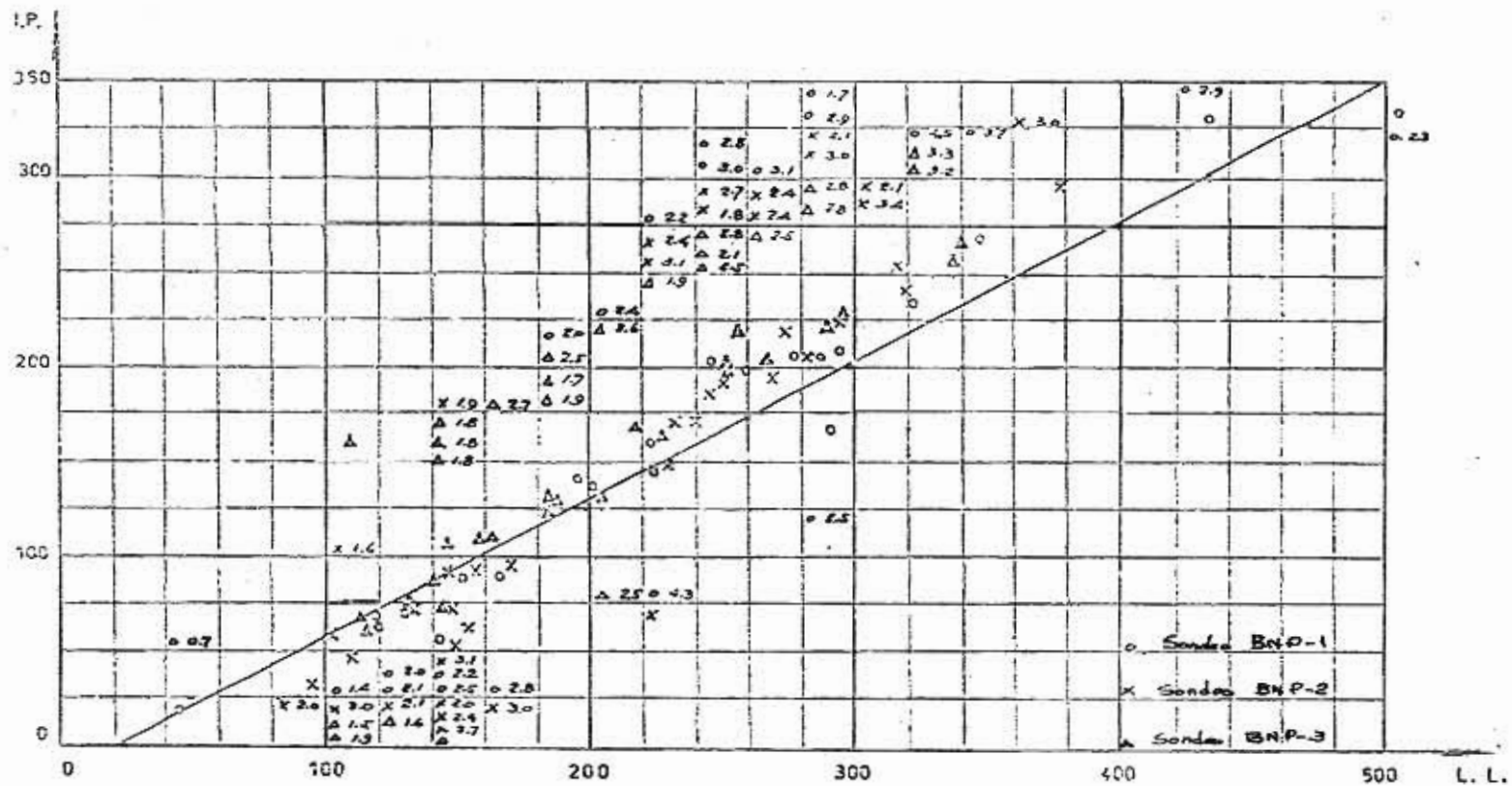


Figura 7. Carta de plasticidad (sondeo BNP-1, BNP-2, BNP-3) en función de la relación de vacíos  $e_v'$

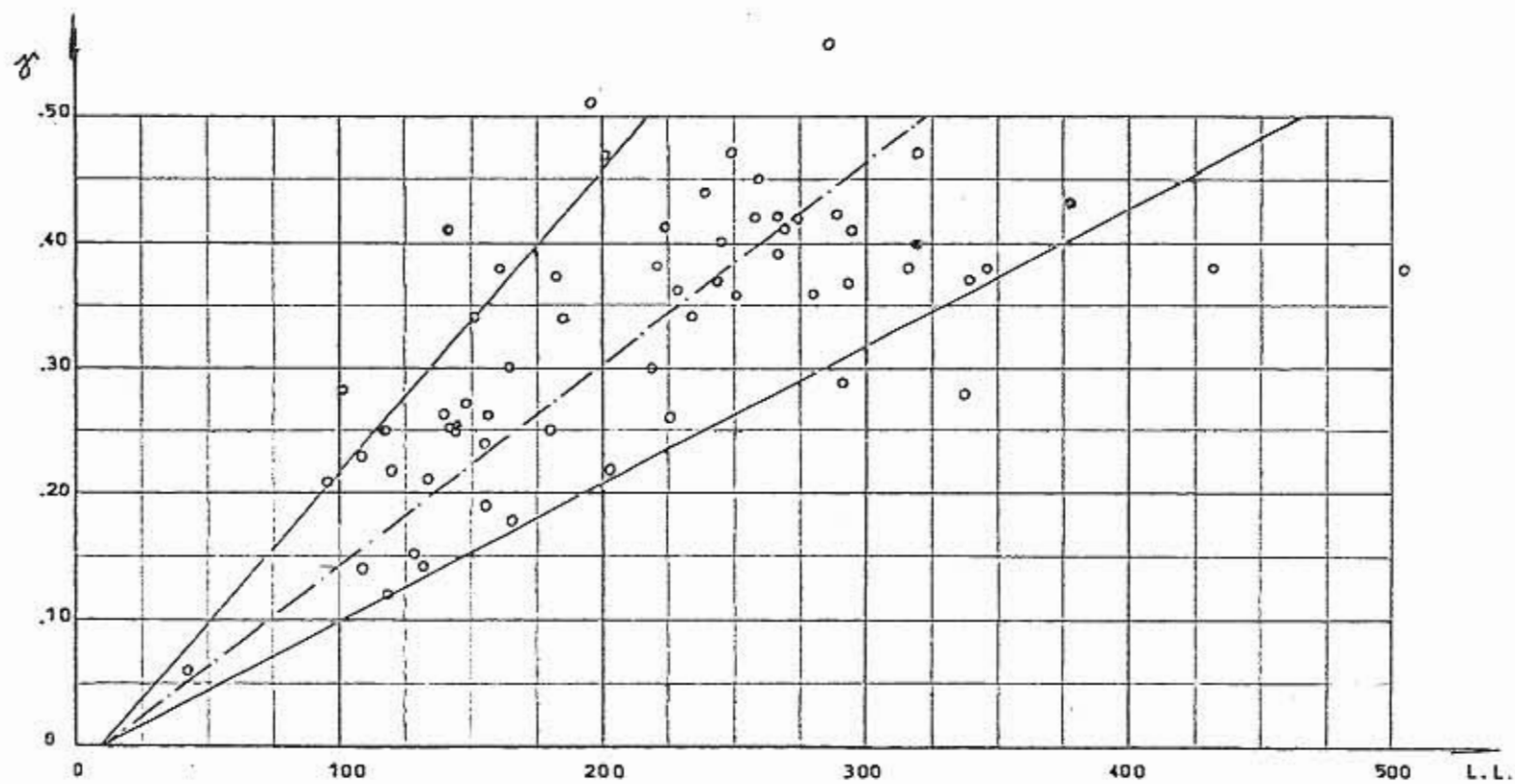


Fig. 8 Correlación entre el coeficiente  $\gamma$  y el límite líquido.



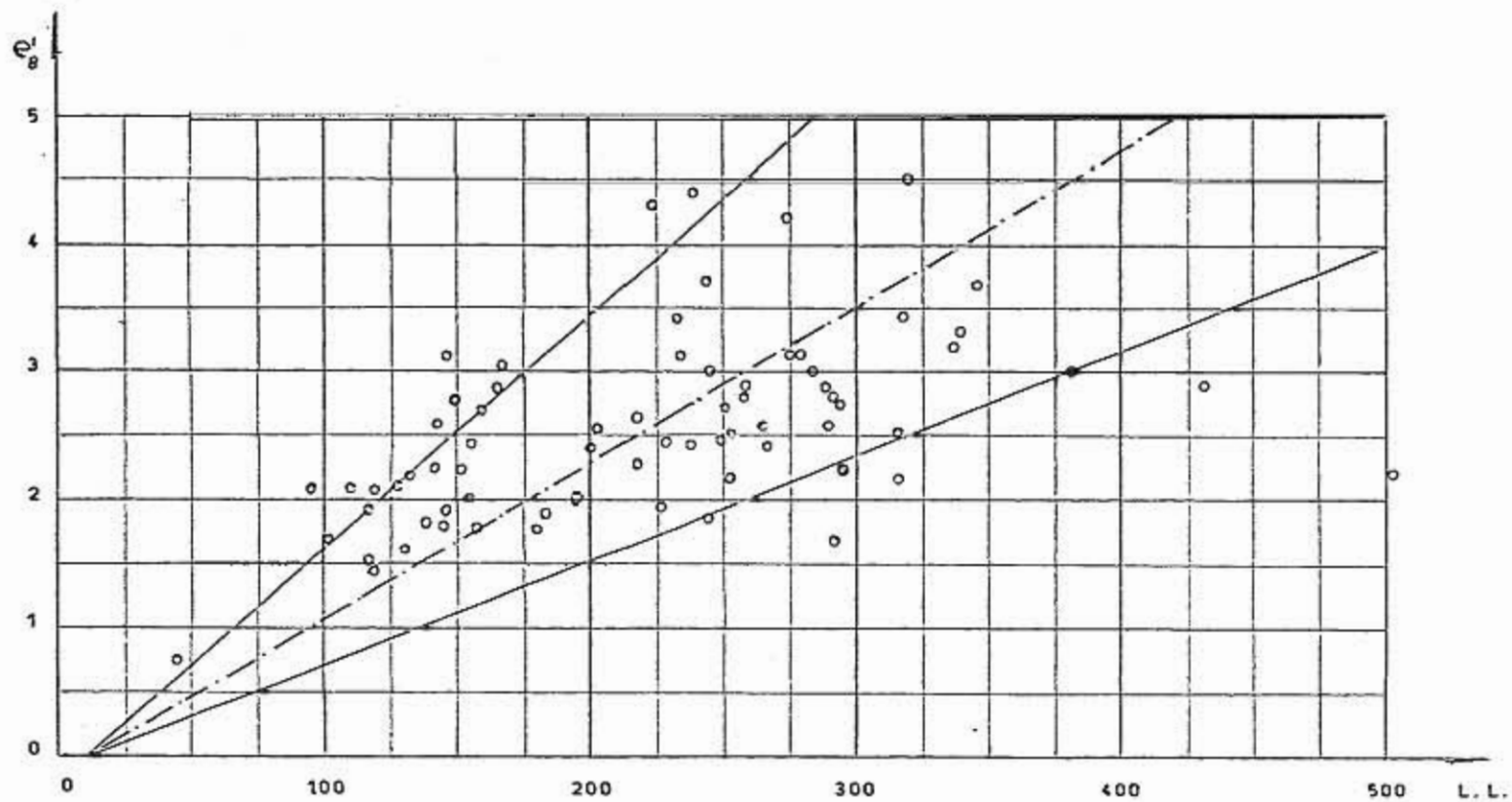


Fig. 9 Correlación entre la relación de vacíos  $e_s$  y el límite líquido.

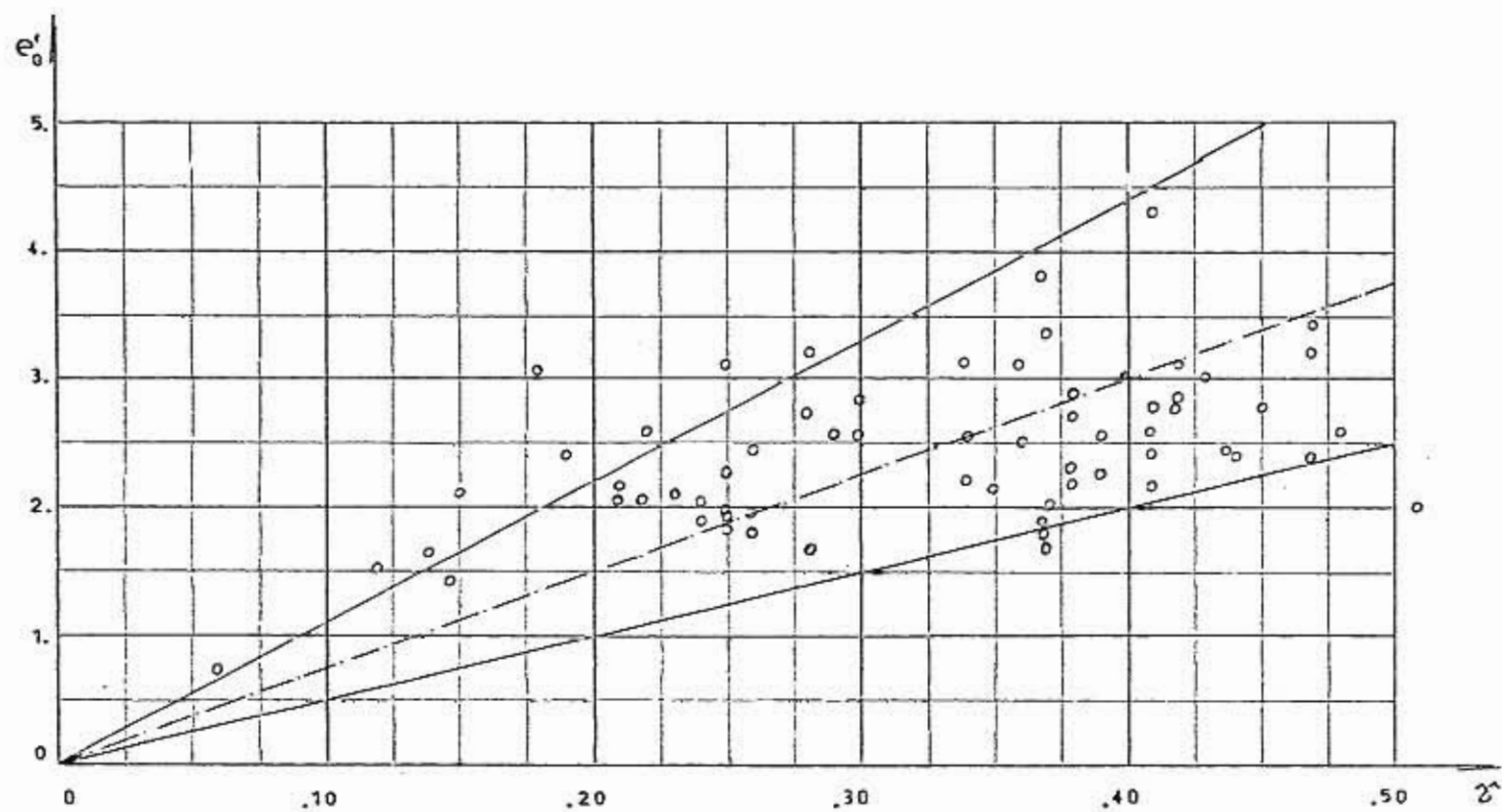


Fig. 10 Correlación entre la relación de vacíos  $e'$  y el coeficiente  $f$  .

APENDICE I.- PRUEBA DE CONSOLIDACION ESTANDAR.

En 1.965, el Dr. Juárez Dadillo, efectuó la aplicación de la teoría presentada a la prueba de consolidación estandar para el caso de la rama de compresibilidad. El resultado obtenido permitió, al autor de la teoría, considerar a la rama virgen de la prueba como una "prueba cuasi-isotrópica"; para ello, hizo el razonamiento siguiente: Para una presión vertical  $\sigma_v$  y una presión horizontal  $\sigma_{II} = K_o \sigma_v$  ( $K_o = \text{constante}$ ), la presión equivalente de consolidación isotrópica es:

$$\sigma_e = \sigma_o + \alpha \sigma_o \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^\beta \quad (30)$$

siendo:

$$\sigma = \frac{1 + 2 K_o}{3} \sigma_v \quad (31)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{2}}{3} (1 - K_o) \sigma_v \quad (32)$$

Si  $V_o$  y  $V$  son los volúmenes de una muestra bajo presiones isotrópicas  $\sigma_o$  y  $\sigma$  respectivamente y si  $V'_o$  ( $< V_o$ ) y  $V'$  ( $< V$ ) son los volúmenes bajo los esfuerzos  $\sigma_o, \tau_o$  y  $\sigma, \tau$  correspondientes a presiones dadas  $\sigma_{vo}$  y  $\sigma_v$ , se puede escribir, aplicando la expresión (10).

$$V'_o = V_o \left( \frac{\sigma_e + \alpha \sigma_e \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^\beta}{\sigma_o} \right)^{-\lambda} = V_o \left( 1 + \alpha \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^\beta \right)^{-\lambda} \quad (33)$$

$$V' = V \left( \frac{\sigma_e + \alpha \sigma_e \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^\beta}{\sigma} \right)^{-\lambda} = V \left( 1 + \alpha \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^\beta \right)^{-\lambda} \quad (34)$$

Si se supone que  $\tau_f \sim \sigma$  se obtiene de la ecuación 31 -- que  $\tau_f \sim \sigma$ , y de la ecuación 32 que  $\tau \sim \sigma_v$ , entonces  $\frac{\tau}{\tau_f}$  es constante en la rama virgen de la prueba de consolidación estandar, y se puede escribir que:

$$\frac{V'}{V_0} = \frac{V}{V_0} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{-\gamma} = \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_{v_0}}\right)^{-\gamma} \quad (35)$$

Se observa, de esta última expresión, que el coeficiente de compresibilidad  $\gamma$  puede determinarse de este tipo de prueba.

Substituyendo la ec. 31 en la ec. 30 se obtiene:

$$\sigma_e = \frac{1+2k_0}{3} \sigma_v \left\{ 1 + \alpha \left[ \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{(\sigma_1 + \sigma_3)_f} \right]^p \right\}$$

Se observa de la ecuación 36, que  $\sigma_0$  no es necesariamente igual a  $\sigma_v$  y, consecuentemente, la presión de poro inicial  $\Delta u = \Delta \sigma_v$  en cualquier etapa de la prueba no es necesariamente igual a la presión de poro disipada (ref. 5)  $(\Delta u)_d = \Delta \sigma_e$

Una análisis comprensivo de la rama de expansión de la curva de consolidación en este tipo de prueba, considera el Dr. Juárez Badillo, necesitaría una teoría de esfuerzo-deformación. El proceso de expansión, explica el Dr. Juárez Badillo, es esencialmente una prueba triaxial de extensión; cuando disminuye  $\sigma_v$ , el esfuerzo horizontal  $\sigma_H$  disminuye en una cantidad menor, pasando por el punto  $\sigma_v = \sigma_H$  y posteriormente por el punto  $\sigma_H > \sigma_v$ , finalmente resultando en una falla de presión pasiva.

Sin embargo la curva de expansión experimental podría aproximarse con una expresión del tipo de la ecuación 12; entonces al coeficiente de expansión y a la relación expansión-compresibilidad podrían designarse como  $\gamma'$  y  $\rho'$  de manera que

$$\gamma' = \delta \cdot \rho' \quad (37)$$

y la ecuación 12 se puede escribir:

$$\frac{v_o}{v} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^{\delta_p} \quad (36)$$

Quando se emplea la relación o, la relación  $v/v_o$  puede expresarse por la ec. 15, y como en la práctica, generalmente, la secuencia de cargas en la prueba de consolidación estándar se encuentra normalizada, los valores de  $\delta'$  y  $\delta_p'$  pueden determinarse fácilmente de la fig. 3.

APENDICE II.- RELACIONES ENTRE LOS PARAMETROS DE COMPRESIBILIDAD  $a_v$ ,  $m_v$  y  $C_c$  y EL COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD  $\beta$  : (ref. 5).

En la teoría tradicional de la consolidación unidimensional los parámetros de compresibilidad están definidos de la siguiente manera:

$$\text{coeficiente de compresibilidad } a_v = \frac{-d\sigma}{d\sigma_v} \quad (39)$$

$$\text{coef. de variación volumétrica } m_v = \frac{a_v}{1 + \sigma} \quad (40)$$

$$\text{índice de compresibilidad } C_c = \frac{\sigma_0 - \sigma}{\text{Log} \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}} \quad (41)$$

Puesto que ninguno de los parámetros son constantes para un suelo, las relaciones de los mismos con el coeficiente de compresibilidad  $\beta$ , pueden realizarse sobre la base de: tangencial  $a_v$ , tangencial  $m_v$  y tangencial  $C_c$ , para un punto dado sobre la rama virgen de la curva de consolidación.

$$\text{de la ec. 15 se establece: } \frac{dV}{V} = \frac{d\sigma}{1 + \sigma} \quad (42)$$

relacionando las ecuaciones 1, 39, 40 y 42, se obtiene:

$$m_v = \frac{-d\sigma}{1 + \sigma} \frac{1}{d\sigma_v} = - \frac{dV}{V} \frac{1}{d\sigma_v} = \frac{\beta}{\sigma_v}$$

$$\therefore m_v = \frac{\beta}{\sigma_v} \quad (43)$$

de la ec. 41 se obtiene:

$$d\sigma = - \frac{C_c}{2.303} \frac{d\sigma_v}{\sigma_v} \quad (44)$$

relacionando las ecuaciones 1, 42 y 44, se obtiene:

$$C_c = 2.303 \frac{-dc}{1+c} \frac{\sigma_v}{d\sigma_v} (1+e)$$

de donde:  $C_c = 2.303 \gamma (1+e)$  (45)

relacionando las ecuaciones 39, 44 y 45, se obtiene:

$$a_v = \frac{\gamma(1+e)}{\sigma_v} \quad (46)$$

se observa que el valor de  $\rho'$  podría aproximarse por la relación:

$$\rho' = \frac{C_s}{C_c} \quad (47)$$

donde  $C_s$  es el índice de expansión en la teoría tradicional.

APENDICE III.- APLICACION DE LAS CORRELACIONES EXPRESADAS POR LAS ECUACIONES 22, 25 y 28 A LAS ARCILLAS DE OTRAS CIUDADES.

A manera de ilustración se presentan las propiedades medias de compresibilidad (tabla 4) de las arcillas de diversas ciudades, así mismo se presentan las propiedades de compresibilidad de dichas arcillas obtenidas de la aplicación de las ecuaciones 22, 25 y 28.

TABLA 4. Propiedades de compresibilidad de las arcillas de diversas ciudades (teóricas y experimentales)

arcilla	LL	$\gamma$ exp.	$e'$ exp.	$\gamma$ (ec.22)	$e'$ (ec.25)	$e'$ (ec.28)	LL (ec.22)
Weald	43	0.06	0.51	0.053	0.40	0.45	47.5
Londres	78	0.085	0.77	0.109	0.82	0.64	63.1
Boston	48	0.06	0.92	0.061	0.46	0.46	47.5
Guayaquil							
FAS	116	0.19	1.36	0.170	1.27	1.43	128.8
FAI	81	0.12	1.05	0.114	0.85	0.90	85.0
México DF							
FAS	327	0.42		0.51	3.80	3.15	272.5
FAI	219	0.30		0.35	2.60	2.51	197.5
Sydney							
Inorgánica	52	----	----	0.067	0.50	0.17	----
Orgánica	90	----	----	0.128	0.96	0.93	----

Los datos experimentales del coeficiente de compresibilidad y el límite líquido se han dibujado en la fig. 8 (fig. -- III-1). Del análisis de la figura se observa que todos los -- puntos se localizan dentro de la zona limitada por las envolventes expresadas por las ecuaciones 20 y 21.



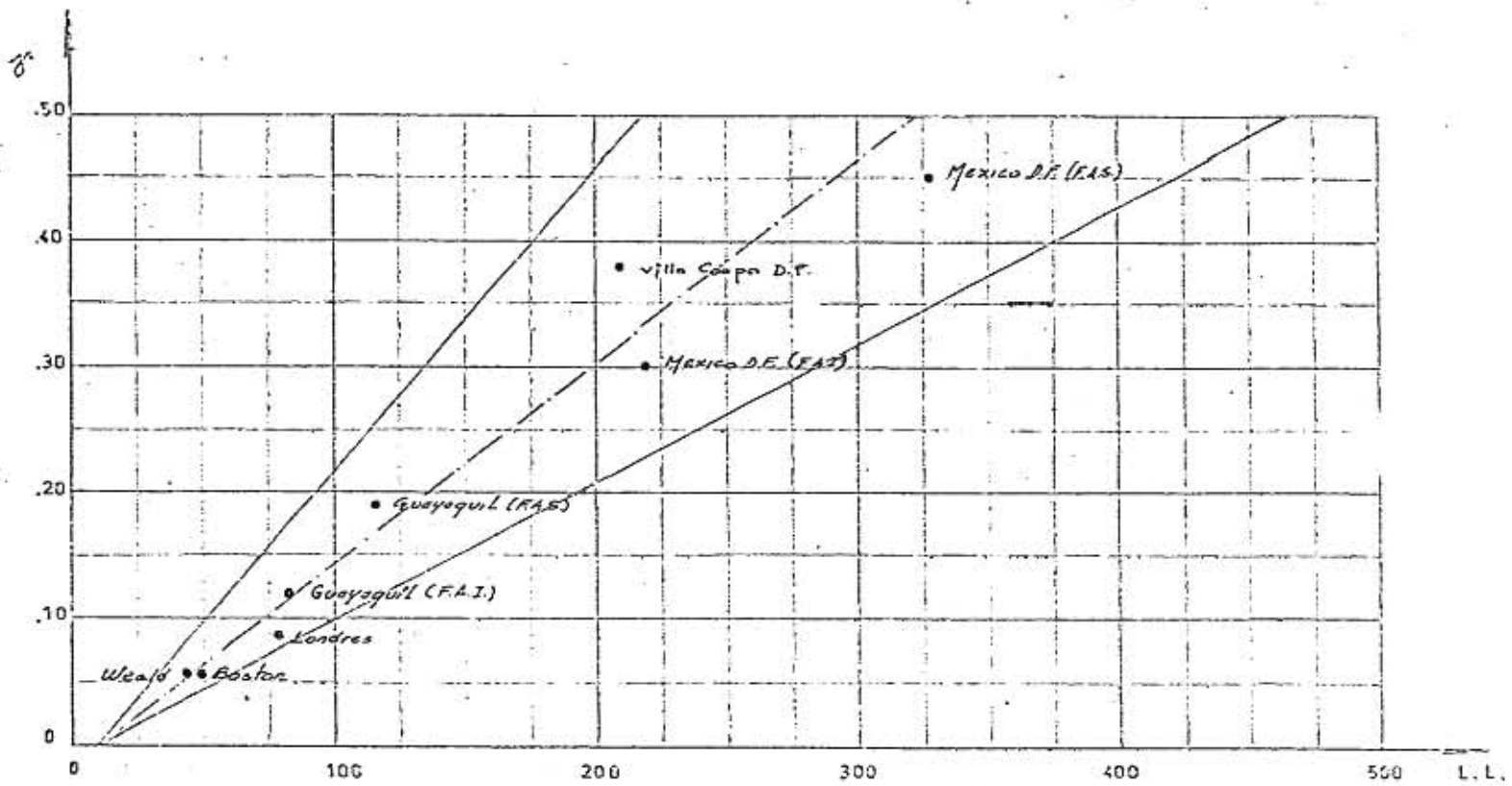


FIG. III-1

APENDICE IV.- EXPRESION PARA EL CALCULO DE ASENTAMIENTOS EN  
 FUNCION DEL COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD ,  
 DERIVADA DE LA EXPRESION TRADICIONAL PARA EL  
 CALCULO DE ASENTAMIENTOS.

En la teoría tradicional de la consolidación unidimensional la expresión para el cálculo de asentamientos esta definida así:

$$\Delta H = \frac{\Delta \sigma}{1 + e_0} H \quad (48)$$

la ec. 48 puede expresarse:

$$\Delta H = \left( \frac{e - e_0}{1 + e_0} \right) H = \left( \frac{(1 + e) - (1 + e_0)}{(1 + e_0)} \right) H \quad (49)$$

substituyendo la ec. 16 en la ec. 49, se obtiene:

$$\Delta H = \left[ \left( \frac{\sigma}{c} \right)^{-\alpha} - 1 \right] H \quad (50)$$

La ec. 50 coincide con la expresión desarrollada para el efecto por el Dr. Juárez Badillo.

### 3.- RESUMEN Y CONCLUSIONES.



En este trabajo se presenta, en la primera parte, una explicación breve de la Teoría de la Compresibilidad de los suelos, desarrollada por el Dr. Juárez Badillo, y las expresiones para el cálculo de los coeficientes  $\gamma$ ,  $\gamma_p$  y  $\rho$ , dadas por las ecuaciones 2, 5 y 13.

En la segunda parte, se determinan los coeficientes  $\gamma'$ ,  $\gamma'_p$  y  $\rho'$ , para las arcillas del Lago Texcoco, con base a la información utilizada, por medio de las ecuaciones 18 y 19, derivadas de las ecuaciones 2 y 5, y de la ecuación 13; se comparan los puntos teóricos con los experimentales de las curvas de consolidación; finalmente, se efectúan las correlaciones entre el coeficiente de compresibilidad  $\gamma'$ , la relación de vacíos  $e'$  y el límite líquido.

En el apéndice I, se presenta la demostración, realizada por el Dr. Juárez Badillo, de que el coeficiente de compresibilidad  $\gamma'$  puede obtenerse de las pruebas de consolidación estandar. Con respecto al coeficiente de expansión  $\gamma_p$  y a la relación expansión-compresibilidad  $\rho$ , como la teoría ha sido desarrollada para presiones isotrópicas, el Dr. Juárez Badillo autor de la teoría, considera que sería necesario desarrollar una teoría de esfuerzo-deformación para justificar la obtención de los mismos de las pruebas de consolidación estandar, considerando los valores determinados de dichas pruebas bastantes aproximados; por esta razón, en el presente trabajo se han designado como  $\gamma'_p$  y  $\rho'$ .

En el apéndice II, se presentan las relaciones entre el coeficiente de variación volumétrica  $m_v$  y el coeficiente de compresibilidad  $\gamma'$ ; y entre el índice de consolidación  $C_c$  y el coeficiente de compresibilidad  $\gamma'$ .

En el apéndice III, a manera de información ilustrativa,

se efectua la correlación entre el coeficiente de compresibilidad  $\beta'$  y el límite líquido, de las arcillas de otras ciudades (tabla 4), y se presenta dibujados, dichos puntos, en la gráfica de la figura 8. Del análisis de la figura (III-1) se observa que todos los puntos se localizan dentro de la zona limitada por las envolventes dadas por las ecuaciones 20 y 21.

En el apéndice IV, se desarrolla, a partir de la expresión que define el asentamiento en la teoría tradicional, -- una ecuación para el cálculo de asentamiento en función del coeficiente de compresibilidad  $\beta'$ , la misma que coincide con la ecuación propuesta por el Dr. Juárez Badillo (ref. 1).

Al finalizar, este trabajo, se puede concluir que:

1) La utilidad de la teoría aplicada consiste en establecer valores generalizados de los coeficientes  $\beta'$ ,  $\beta'_p$  y  $\rho'$ , que permitan estratificar un subsuelo según sus características de compresibilidad; en lo que respecta al subsuelo del Lago Texcoco, en la tabla 3 se muestra una estratigrafía tentativa en función de dichas características, que podría correlacionarse con la estratigrafía geológica tentativa presentada en la tabla 1 de la ref. 3.

2) Se proponen las ecuaciones 22 y 25 para estimar el coeficiente de compresibilidad  $\beta'$  y la relación de vacíos  $e'_0$ , para una presión vertical de 8 kg/cm<sup>2</sup>, en función del límite líquido de un suelo.

3) De la rama de compresibilidad de la curva de consolidación estandar se puede determinar el coeficiente  $\beta'$  por medio de la ecuación 18; así mismo, la rama de expansión de la curva de consolidación estandar puede aproximarse mediante la ecuación 19, como se observa en las figuras 5.

4) Se encuentra una relación entre los parámetros  $m_v$  y  $C_c$  y el coeficiente de compresibilidad  $\gamma$ , con las ecuaciones 43 y 45.

5) Los resultados anteriores indican propiedades de las arcillas en pruebas de consolidación estandar, y los parámetros  $\gamma$  y  $\gamma_p'$  están limitados por el estado de esfuerzos considerado en dichas pruebas. Es de esperarse que en este tipo de prueba la aplicación del coeficiente  $\gamma$ , efectuada en la forma simplista presentada, pueda ser dependiente de la distribución de esfuerzos dentro de una muestra, en lo concierne a los esfuerzos diferidos, y puedan explicar, en cierta forma, la dispersión de resultados al intentar correlacionarlo con la propiedad índice del límite líquido; en ésta aproximación entran, también, todas las incertidumbres y errores propios del ensayo de límite líquido.

6) El campo de desplazamiento es unidimensional que puede ser afectado por causas como la historia de cargas y confinamiento, que no garantizaría un "estado perfecto" totalmente unidimensional del comportamiento de la muestra.

## A G R A D E C I M I E N T O

Mi más sincero agradecimiento a las Autoridades de la SECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS DE MEXICO, en especial al Ing. Luis E. Bracamontes, al Ing. Rodolfo Félix Valdés y al Ing. Juan Durán Romano, a quienes debo mis estudios de maestría.

## RECONOCIMIENTO

Agradezco profundamente al Dr. Eulalio Juárez Badillo ,  
Director de la presente tesis, por sus valiosas indicaciones  
y consejos, y la ayuda que me ha proporcionado.

#### REFERENCIAS.-

- 1.- Juárez Badillo, E. (1965), "Compressibility of Soils", V Simposio del Departamento de Ingeniería Civil ó Hidráulica sobre "Comportamiento de los suelos sometidos a esfuerzos", Indian Institute of Science, Bangalore, India.
- 2.- Juárez Badillo, E. (1973), "Reflexiones sobre el comportamiento de los suelos", Revista Ingeniería, Vol 43 N° 1, México.
- 3.- Marsal, R. J. y Graue, R. (1969), "El subsuelo del Lago Texcoco", Volumen Nabor Carrillo, México.
- 4.- Alborro, J., Herrera, I., León, J. L., y Chen. B., (1974) "Análisis de asentamientos para la construcción de los lagos del Plan Texcoco", Instituto de Ingeniería, UNAM, informe N° 340, México.
- 5.- Juárez Badillo, E. (1975), "Constitutive Relationships for soils", Simposio sobre Desarrollos Recientes en el análisis del comportamiento de suelos y su aplicación a estructuras geotécnicas", Universidad de New South Wales, Sydney, (por publicarse).

#### BIBLIOGRAFIA.-

- 1.- Terzaghi, K. y Peck, R. (1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, New York.
- 2.- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. (1963, 1967), -- "Mecánica de Suelos", Vol I y II, Ed. Revista Ingeniería, México.