

RESISTENCIA ESTRUCTURAL DE LA ARCILLA TIPICA DEL VALLE DE MEXICO EN EL ODOMETRO Y SU IMPLICACION EN LA OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE COMPRESIBILIDAD.

FRANCISCO JAVIER PANIAGUA MEDINA

T R A B A J O

Presentado a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

como requisito para obtener

el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(MECANICA DE SUELOS)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ciudad Universitaria, D. F., 20 de Mayo de 1988



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.

AL COORDINADOR DE LA SECCION
DE MECANICA DE SUELOS
P r e s e n t e .

Por medio de la presente proponemos el siguiente tema de trabajo para ser desarrollado por el ING. FRANCISCO JAVIER PANIAGUA MEDIRA, como parte de los requisitos para obtener mediante un examen general de conocimientos el grado de Maestro en Ingenieria (Mecánica de Suelos):

"Resistencia estructural de la arcilla típica del Valle de México en el odómetro y su implicación en la obtención de los parámetros de compresibilidad"

El tema se deberá desarrollar en un lapso no mayor de 30 días calendario, y de acuerdo con el siguiente índice:

- Conceptos Teóricos
- Descripción de la prueba del odómetro
- Metodología de la prueba
- Determinación de parámetros
- Interpretación de las pruebas
- Conclusiones

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 20 de Abril de 1988

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN


DR. LEONARDO ZEEVAERT WIECHERS


DR. EULALIO JUAREZ BADILLO


DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD

C.c.p. M en I Gabriel Sánchez Guerrero - Secretario Académico de la DEPMI

C O N T E N I D O

- I.- INTRODUCCION
- II.- CONCEPTOS TEORICOS
- III.- DESCRIPCION DE LA PRUEBA DEL ODOMETRO
- IV.- METODOLOGIA DE LA PRUEBA
- V.- DETERMINACION DE PARAMETROS
- VI.- INTERPRETACION DE LAS PRUEBAS
- VII.- CONCLUSIONES

REFERENCIAS

- ANEXO A. EJEMPLO DE APLICACION PRACTICA
- ANEXO B. CURVAS DE CONSOLIDACION INTERPRETADAS
PARA LAS 3 PRUEBAS REALIZADAS

LISTA DE FIGURAS.

- Fig. 1* Curva típica esfuerzo-deformación en compresión no confinada en arcilla del Valle de México.
- Fig. 2* Curva de compresibilidad en arcilla inalterada de la Ciudad de México.
- Fig. 3* Adquisición de resistencia al esfuerzo cortante.
- Fig. 4* Solidificación de una arcilla con minerales activos.
- Fig. 5* Odómetro o consolidómetro.
- Fig. 6* Curva de compresibilidad y curva de consolidación - obtenidas de una prueba en el odómetro.
- Fig. 7* Componentes de la deformación del suelo en el proceso de consolidación.
- Figs. 8, 9 y 10.-* Curvas de compresibilidad para las 3 pruebas realizadas.
- Figs. 11, 12 y 13* Curvas de parámetros de consolidación para las 3 pruebas realizadas.

I.- INTRODUCCION

En este trabajo se presentan los aspectos más importantes del comportamiento mecánico de la arcilla limosa típica del Valle de México, relacionados con su resistencia estructural, cuando se sujeta a compresión confinada a cero deformación lateral en el odómetro.

Se detallan brevemente la formación y composición de los depósitos que forman el subsuelo de la Ciudad de México, aspectos necesarios para comprender su comportamiento mecánico. Se analiza el concepto de esfuerzo crítico como límite de la resistencia estructural del suelo y se describe el fenómeno de endurecimiento o solidificación. Además, se presentan los conceptos más importantes de la Teoría de Viscosidad Intergranular, desarrollada por Zeevaert, para materiales que exhiben consolidación secundaria. Existen otras teorías que interpretan este fenómeno, sin embargo, la descrita en este trabajo es la única que permite obtener en forma práctica, los parámetros que definen el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo de estos sedimentos.

Se resumen algunos aspectos importantes en la ejecución de las pruebas en el odómetro y finalmente se presentan los resultados de 3 pruebas realizadas en arcilla típica, con el objeto de ilustrar el concepto de esfuerzo crítico y la variación de los parámetros de compresibilidad antes y después de pasar la resistencia estructural del suelo.

II.- CONCEPTOS TEORICOS

II.1 ORIGEN Y COMPOSICION DEL SUELO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

Los depósitos de origen lacustre característicos del subsuelo - en la cuenca del Valle de México se formaron, durante el Pleistoceno, a partir de la precipitación de cenizas volcánicas y otros materiales piroclásticos sobre el lago que cubría la cuenca (Ref. 1). Al depositarse en el lago, las cenizas volcánicas se devitrificaron y sedimentaron, dando lugar a una arcilla de características y propiedades mecánicas singulares. Su sedimentación fue interrumpida ocasionalmente por lluvias de arena y vidrio volcánico, que constituyen marcadores importantes para correlaciones estratigráficas, así como superficies definidas de drenaje durante el proceso de consolidación.

La composición mineralógica de estas arcillas lacustres ha sido objeto de gran cantidad de estudios por parte de diversos autores (Ref. 2). Las investigaciones más reconocidas indican -- que los principales minerales en su composición son la montmorilonita (Zeevaert, 1949) e illita y montmorilonita (Marsal y Mazari, 1959), conteniendo además arena muy fina, limo, diatomeas y conchas microscópicas, así también sales como carbonatos, bicarbonatos y cloruros de sodio disueltas en el agua intersticial.

Como consecuencia de su composición y formación, la arcilla del Valle de México resulta un suelo de propiedades singulares, -- con contenidos de agua que alcanzan hasta 400 % o más, alta compresibilidad y una estructuración que le permite tener un compor

tamiento elástico notable para esfuerzos muy cercanos a su resistencia al esfuerzo cortante. En la Fig. 1, se muestra una curva típica esfuerzo-deformación, obtenida de una prueba de compresión no confinada, en una muestra inalterada de la arcilla de México.

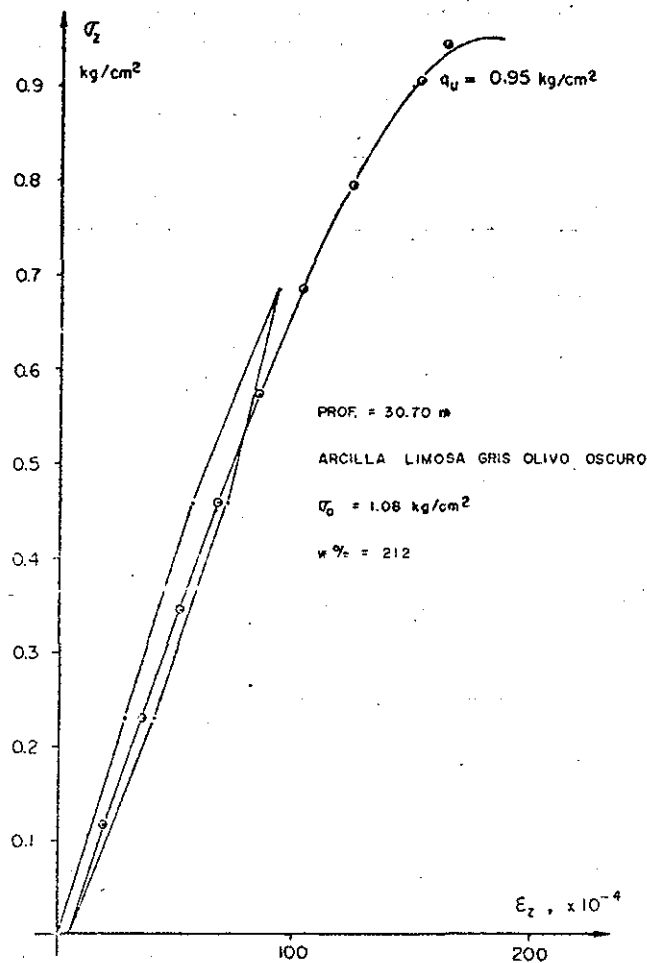


Fig. 1 Curva típica esfuerzo-deformación en compresión no confinada en arcilla del Valle de México

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.2 CONCEPTO DE ESFUERZO CRITICO

En arcillas de alta sensibilidad, el esfuerzo crítico (σ_b) se define como el esfuerzo efectivo que corresponde al quiebre en la curva de compresibilidad, obtenida de una prueba en el odómetro (Zeevaert, Ref. 1) Fig. 2.

El esfuerzo crítico representa el esfuerzo máximo que la estructura original de la arcilla puede soportar bajo condiciones de confinamiento a cero deformación lateral. A partir de este punto, la arcilla sufre un colapso estructural y sus partículas tienden a formar un nuevo arreglo, produciéndose grandes desplazamientos verticales.

Al final del proceso, el nuevo arreglo estructural dará origen a un material más resistente.

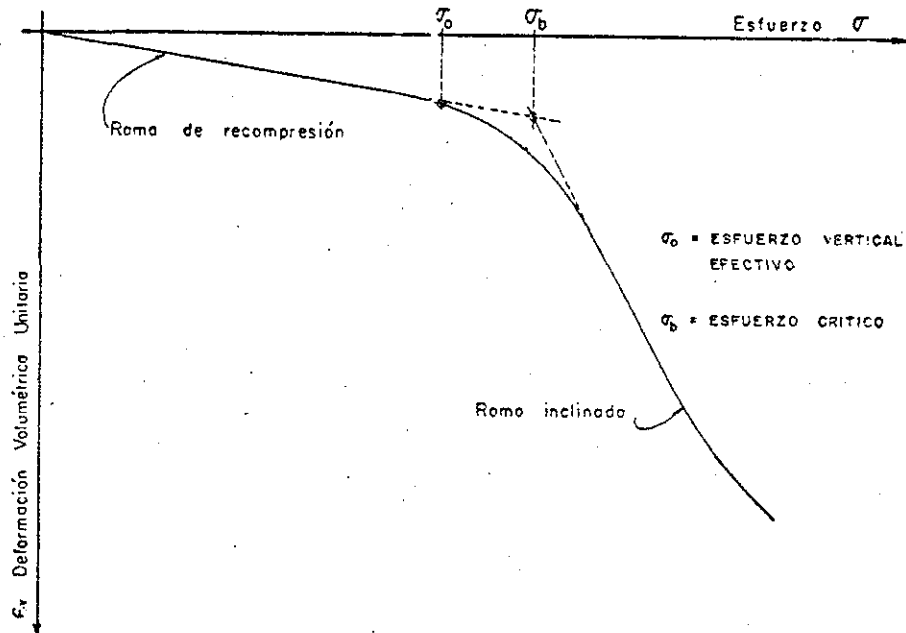


Fig. 2 Curva de compresibilidad en arcilla inalterada de la Ciudad de México

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.3 EL ESFUERZO CRÍTICO Y LA RESISTENCIA DEL SUELO.

En la arcilla de la Ciudad de México pueden distinguirse dos tipos de resistencias: la resistencia al esfuerzo cortante del suelo medida en una prueba de compresión no confinada, y el esfuerzo crítico, obtenido de una prueba de compresión confinada a cero deformación lateral en el odómetro.

En el proceso de formación del suelo, a medida que éste se va sedimentando y consolidando bajo el peso del material que soporta, la arcilla va adquiriendo resistencia, Fig. 3.

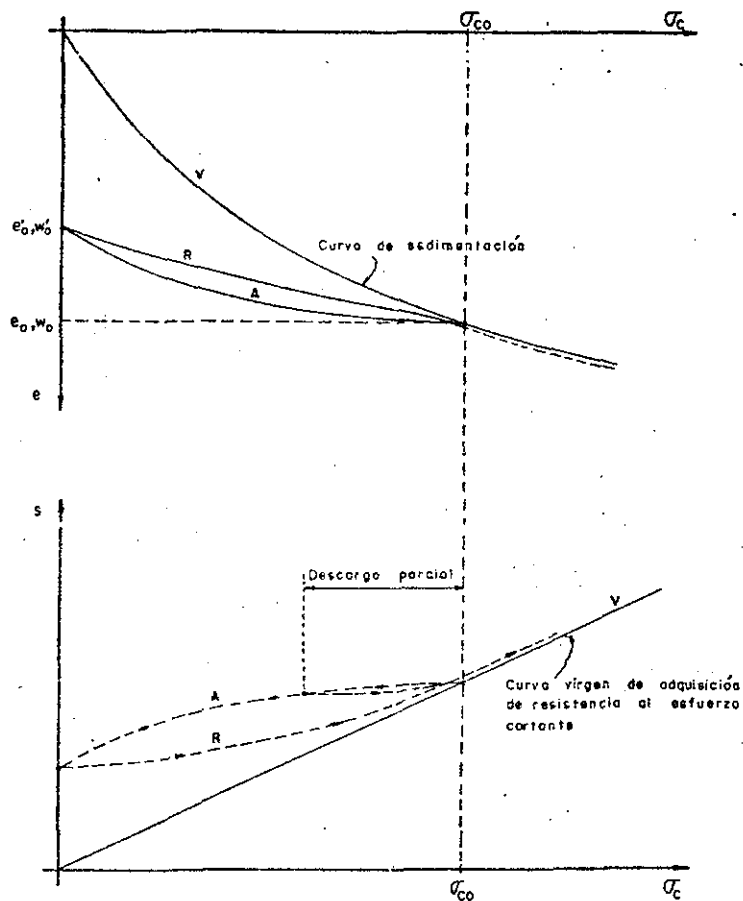


Fig. 3 Adquisición de resistencia al esfuerzo cortante

Quando el material es extraído, sufre un alivio parcial de esfuerzos, manteniéndose parte de su esfuerzo inicial (σ_{ck}) gracias a las fuerzas de capilaridad. La resistencia al esfuerzo cortante disminuye ligeramente, de manera que al efectuar en estas condiciones una prueba de compresión no confinada se obtendrá una resistencia menor, pero bastante cercana a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en su estado natural. De acuerdo con Terzaghi, para fines prácticos puede considerarse (Ref. 3):

$${}^{(s)}\sigma_{co} = {}^{(s)}\sigma_{ck} = \frac{1}{2} q_u \quad \text{-----} \quad (1)$$

El esfuerzo crítico, obtenido a partir de la curva de compresibilidad en pruebas en el odómetro, representa el esfuerzo máximo que la estructura de la arcilla puede soportar en condiciones de cero deformación lateral. La relación entre el esfuerzo crítico y la resistencia al esfuerzo cortante del material, se puede expresar teóricamente como (Ref. 4):

$$\sigma_b = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} (2c) \quad \text{-----} \quad (2)$$

La relación $\sigma_b / 2c$ para arcillas típicas de la ciudad de México ha sido reportada por Zeevaert (Ref.4), encontrándose que varía entre 1.35 y 1.50 .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.4 FENOMENO DE ENDURECIMIENTO

En arcillas extrasensitivas, la diferencia entre el esfuerzo efectivo y el esfuerzo crítico, denominada "resistencia de adherencia" por Terzaghi (Ref. 5), es consecuencia del desarrollo de contactos más firmes entre las partículas que forman la estructura del material, debido a un proceso físico -- químico, aunado a la acción del estado de esfuerzos bajo el cual ha sido sometido el material durante un largo período de tiempo. Fig. 4. Este fenómeno denominado "endurecimiento o solidificación" por Zeevaert (Ref. 3), ocurre principalmente en arcillas que contienen minerales activos, como las arcillas de la Ciudad de México.

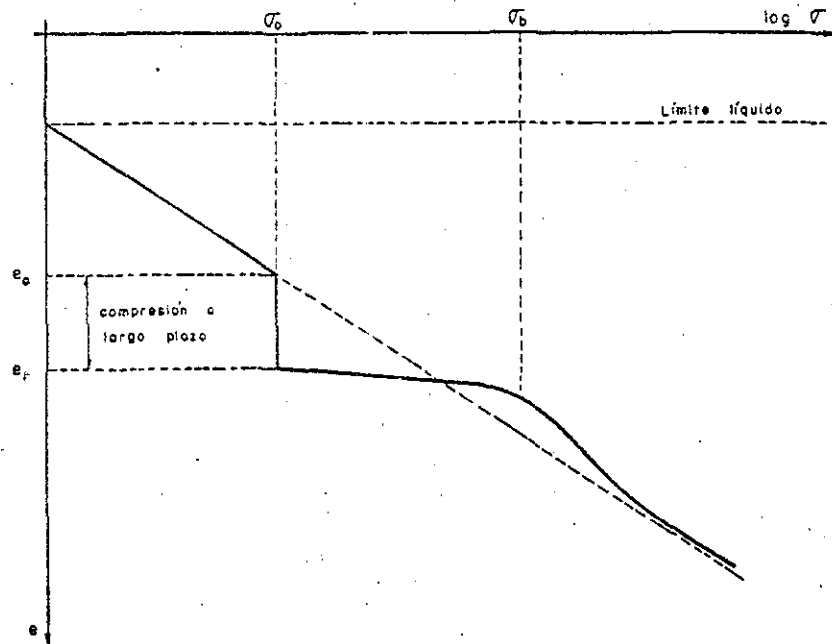


Fig. 4 Solidificación de una arcilla con minerales activos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para cuantificar su magnitud, Zeevaert (1947) introdujo el concepto de " índice de adherencia ":

$$I_B = \frac{\sigma_b - \sigma_0}{\sigma_0} \quad \text{-----} \quad (3)$$

el cual puede alcanzar en arcillas vírgenes de la Ciudad de México un valor hasta de 0.5 (Ref. 4).

II.5 TEORIA DE VISCOSIDAD INTERGRANULAR

En la arcilla de la ciudad de México se presenta el fenómeno conocido como " viscosidad intergranular ", término aplicado por Zeevaert para definir el comportamiento altamente viscoso inducido por el desplazamiento relativo de las partículas minerales. (Ref. 4).

A través de un trabajo desarrollado durante varias décadas, este autor ha encontrado una teoría que permite obtener en forma práctica, los parámetros que definen el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo en materiales que exhiben viscosidad intergranular.

La teoría está basada en el modelo de Terzaghi y en un modelo denominado por él " Unidad Z ", para definir el fenómeno secundario.

Las hipótesis de esta teoría son (Ref. 6):

- 1) El suelo está formado de dos estructuras con diferentes propiedades reológicas, denominadas " estructura primaria y secundaria "
- 2) La estructura primaria está constituida por la fracción gruesa, formando un esqueleto estructural capaz de tomar esfuerzos efectivos, sufriendo deformaciones elastoplásticas. Sus poros se consideran saturados con agua g r a v i t a

<p style="text-align: center;">TESIS CON FALLA DE ORIGEN</p>
--

cional libre de aire. Esta estructura queda idealizada con el Modelo de Terzaghi.

3).- La estructura secundaria, Unidad Z, está formada por la fracción fina y ultrafina del suelo, que se encuentra formando flóculos entre los granos mayores. Sus poros se encuentran saturados con agua de viscosidad mayor a la del agua gravitacional.

Por medio de estos modelos, el autor encontró que el comportamiento del suelo, tanto en campo como en laboratorio, se puede representar por medio de la siguiente ecuación teórica expresada en forma adimensional:

$$\Omega = \frac{\Delta \epsilon_v}{m_{ep} \Delta \sigma} = F(T_v) + \beta \log_{10}(1 + \xi T_v) \quad \text{-----} \quad (4)$$

El desarrollo aparece en la Ref. 6. En la expresión anterior:

$\Delta \epsilon_v$ = Deformación unitaria volumétrica.

m_{ep} = Módulo secante de compresibilidad volumétrica unitaria, de la consolidación primaria igual a $\Delta \epsilon_v / \Delta \sigma$

β = Relación entre la magnitud de la consolidación secundaria y la primaria.

$\Delta \sigma$ = Incremento de esfuerzo que produce la consolidación del suelo.

Ω = Configuración de las curvas de consolidación en función de T_v

$F(T_v)$ = Función de Terzaghi para la consolidación primaria, siendo T_v el factor tiempo definido como

$$T_v = C_v \cdot t / H^2 \quad \text{-----} \quad (5)$$

ξ = Parámetro adimensional que mide la rapidez de variación con el tiempo de la consolidación secundaria, igual a

$$\xi = \frac{H^2}{T C_v} \quad \text{-----} \quad (6)$$

en la que T representa el tiempo de retardamiento del fenómeno de viscosidad intergranular y C_v es el coeficiente de consolidación.

III.- DESCRIPCION DE LA PRUEBA DEL ODOMETRO.

La compresibilidad de suelos finos saturados se estudia empleando un aparato diseñado por Terzaghi, denominado odómetro o consolidómetro. Con el empleo de este aparato es posible encontrar las relaciones esfuerzo-deformación-tiempo del suelo, bajo condiciones de confinamiento a cero deformación lateral. Esta condición en campo sólo puede presentarse cuando el espesor del estrato es pequeño comparado con las dimensiones de la superficie cargada.

El equipo consiste básicamente en un anillo metálico en el cual se introduce la muestra, un dispositivo de aplicación de cargas y un extensómetro para medir las deformaciones verticales, Fig. 5.

La muestra de material inalterado se introduce cuidadosamente en el anillo metálico, labrándola circularmente y presionando, para garantizar que está sujeta a la condición de cero deformación lateral, esto es:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ξ = Parámetro adimensional que mide la rapidez de variación con el tiempo de la consolidación secundaria, igual a

$$\xi = \frac{H^2}{T C_v} \quad \text{-----} \quad (6)$$

en la que T representa el tiempo de retardamiento del fenómeno de viscosidad intergranular y C_v es el coeficiente de consolidación.

III.- DESCRIPCION DE LA PRUEBA DEL ODOMETRO.

La compresibilidad de suelos finos saturados se estudia empleando un aparato diseñado por Terzaghi, denominado odómetro o consolidómetro. Con el empleo de este aparato es posible encontrar las relaciones esfuerzo-deformación-tiempo del suelo, bajo condiciones de confinamiento a cero deformación lateral. Esta condición en campo sólo puede presentarse cuando el espesor del estrato es pequeño comparado con las dimensiones de la superficie cargada.

El equipo consiste básicamente en un anillo metálico en el cual se introduce la muestra, un dispositivo de aplicación de cargas y un extensómetro para medir las deformaciones verticales, Fig. 5.

La muestra de material inalterado se introduce cuidadosamente en el anillo metálico, labrándola circularmente y presionando, para garantizar que está sujeta a la condición de cero deformación lateral, esto es:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

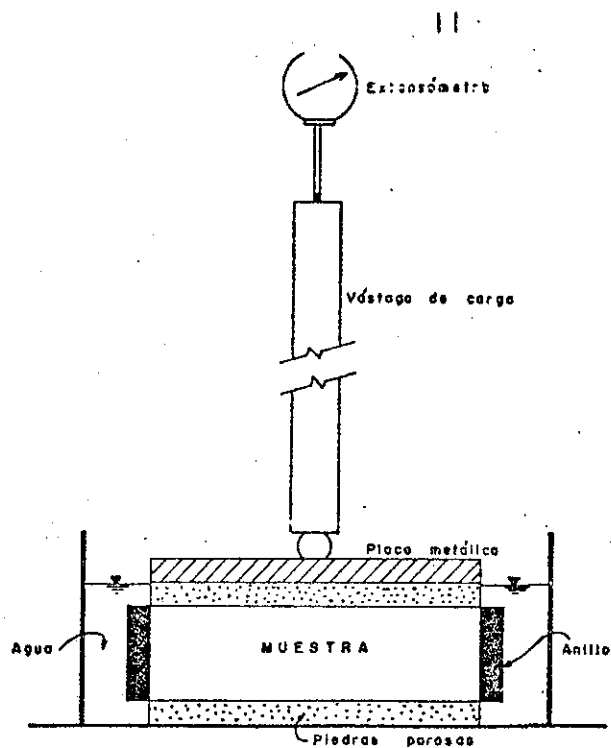


Fig 5 Odómetro o Consolidómetro

Una vez que se ha introducido la muestra en el anillo, se enrasan ambas caras evitando amasar el material y se cubren con -- piedras porosas, que permitirán la salida del agua durante el -- proceso de consolidación.

La prueba consiste en aplicar incrementos de esfuerzo, de -- acuerdo a una programación definida, registrando para cada in-- cremento la evolución de las deformaciones con el tiempo, duran-- te un lapso suficiente para que se defina claramente el tramo -- de consolidación secundaria.

Cada incremento de esfuerzos produce una deformación vertical -- de la muestra $\Delta \epsilon_z$, que dadas las condiciones de deformación -- representa una reducción en el volumen de vacíos del material, -- por lo que al final se obtiene una " curva de compresibilidad " -- expresada en función de σ vs. ϵ_v , o más comunmente, σ vs. e -- (oquedad), Fig. 6.a.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para cada incremento $\Delta \sigma$, se dibuja la evolución de la deformación con el tiempo, es decir, el desarrollo del proceso de consolidación del suelo para el incremento de esfuerzo al cual fue sometido el material. Estas gráficas se conocen como "curvas de consolidación", Fig. 6,b, y son básicas para obtener los parámetros de compresibilidad del suelo, para lo cual conviene dibujarlas en escala S vs. $\log t$ (escala semilogarítmica), a fin de compararlas con la curva teórica de consolidación.

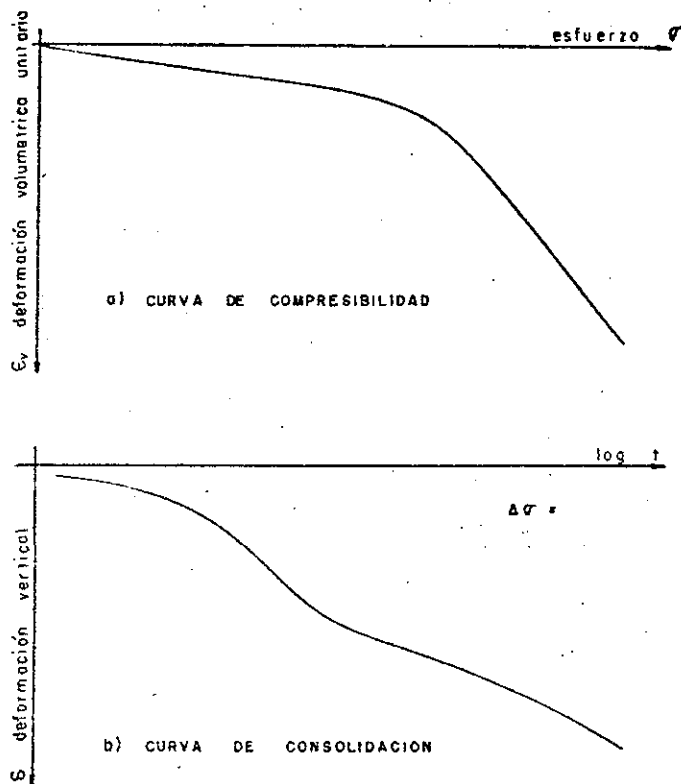


Fig. 6 Curva de compresibilidad y curva de consolidación obtenidas de una prueba en el odómetro

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.- METODOLOGIA DE LA PRUEBA

El procedimiento general de la prueba del odómetro es bastante conocido. Se puede dividir básicamente en las siguientes etapas:

- a) Calibración del equipo. El objeto de esta etapa es determinar la compresibilidad del aparato, es decir, la deformación que sufren las partes propias del equipo para cada incremento de carga.
- b) Labrado de la probeta. Durante esta etapa se busca introducir la muestra de suelo dentro del anillo metálico, con la menor alteración del material. Es necesario que el ajuste de la muestra dentro del anillo sea lo más perfecto posible para conseguir la condición

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0$$

Al realizar el labrado se debe efectuar una descripción detallada de cada probeta, distinguiendo entre los accidentes naturales propios del suelo (vetas, concreciones, etc.) y los accidentes producidos por remoldeo o alteración durante el muestreo (fisuras, ablandamiento del material, etc.).

- c) Saturación de la probeta. Una vez que la probeta de suelo junto con piedras porosas y placa metálica está centrada en la cazuela de consolidación, se procede a colocar suavemente el primer incremento de esfuerzo. Este primer incremento debe ser igual o ligeramente mayor que el potencial de expansión remanente del suelo (σ_{pr}), es decir, el esfuerzo que evita la expansión por adsorción de agua en los minerales de arcilla. Posteriormente, se puede proceder a

inundar lentamente el material.

- d) *Consolidación de la probeta. A partir del segundo incremento se puede registrar la evolución de las deformaciones con el tiempo. Para ello, se coloca suavemente el incremento de carga programado y se toman lecturas a diferentes tiempos. En la práctica se seleccionan tiempos que definen con claridad la curva de consolidación en escala semi-logarítmica.*

A pesar de que la prueba del odómetro se sujeta a un procedimiento que podría considerarse "estandarizado", existen algunos detalles que merecen una consideración aparte, entre los que destacan (Ref. 7):

- 1) *Tamaño de la muestra. Las dimensiones ideales de una probeta de consolidación están relacionadas con varios factores. El factor más condicionante se refiere al costo del muestreo, que limita el diámetro de las muestras extraídas a valores de 5" o incluso 4". Además, deberá tenerse en cuenta que el muestreo ha producido un anillo de material alterado junto al muestreador.*

Por otra parte, el espesor de la probeta depende de la permeabilidad del material y de la duración de la prueba. En efecto, el tiempo de consolidación es proporcional al cuadrado del semi-espesor de la probeta e inversamente proporcional a la permeabilidad del suelo. De manera que para un cierto material, deberá analizarse qué espesor permite definir con claridad la curva de consolidación en un tiempo razonable, que generalmente se limita a 24 horas.

Finalmente, durante el labrado se genera una película de material alterado, cuya influencia en la representatividad de la prueba será menor a mayor dimensión de la probeta.

- 2) *Fricción lateral.* Parte de la carga que se aplica se transmite al anillo por efecto de la fricción lateral. A mayor altura del anillo mayor efecto tendrá. Sin embargo, reducir el espesor de la probeta aumentaría la influencia del remoldeo durante el labrado. Para disminuir la fricción, se puede aplicar una película de grasa repelente en la pared del anillo, con lo cual la fricción lateral se reduce a valores que implican una corrección tan pequeña (1 a 3 %, Ref. 8), que para fines prácticos puede desprejarse.
- 3) *Secuencia de cargas.* En las pruebas "convencionales" es -- práctica común duplicar la carga aplicada anteriormente, -- cada 24 horas. Sin embargo, en la construcción de edificios la aplicación de la carga es aproximadamente lineal, -- es decir, la magnitud de los incrementos varía poco. Además, los incrementos aplicados en estas pruebas son ajenos a toda programación que tome en cuenta las características del material.

De un estudio efectuado para la arcilla típica del Valle de México (Ref. 9), se concluye que los parámetros obtenidos de pruebas convencionales son muy inconsistentes, es decir, sus variaciones con el nivel de esfuerzo son erráticas comparadas con las pruebas de carga lineal. Además, -- cuando los incrementos se aplican en forma geométrica se -- dificulta la obtención del esfuerzo crítico.

V.- DETERMINACION DE PARAMETROS.

Como se mencionó en el inciso II.5, existen varias teorías que tratan de interpretar el comportamiento de suelos que exhiben viscosidad intergranular. Sin embargo, la única teoría que incluye una metodología para obtener los parámetros que emplea es la Teoría de Viscosidad Intergranular desarrollada por Zeevaert. La secuencia de obtención de parámetros, descrita en la Ref. 6, es la siguiente:

La curva teórica está expresada por:

$$S = S_{ep} F(T_v) + C_t \log (1 + \xi T_v) \quad \text{----- (7)}$$

La expresión anterior implica que la curva de consolidación obtenida en la prueba es la suma de la deformación por consolidación primaria y la deformación por viscosidad intergranular, - Fig. 7. C_t es la pendiente de la curva cuando se define la ley logarítmica del fenómeno secundario, por lo que puede obtenerse como la diferencia de ordenadas en un ciclo de la escala logarítmica.

Se escoge un punto B (S_B, t_B) en el lugar donde la curva de consolidación sufre una inflexión en su curvatura. Se supondrá que este punto corresponde a la terminación de la compresión primaria. Se escoge otro punto F (S_F, t_F) al final de la curva de consolidación. Se calculan:

$$a = 2.31 \cdot \frac{S_B - S_F}{C_t} \quad \text{----- (8)}$$

y

$$T = \frac{e^a \cdot t_F - t_B}{1 - e^a} \quad \text{----- (9)}$$

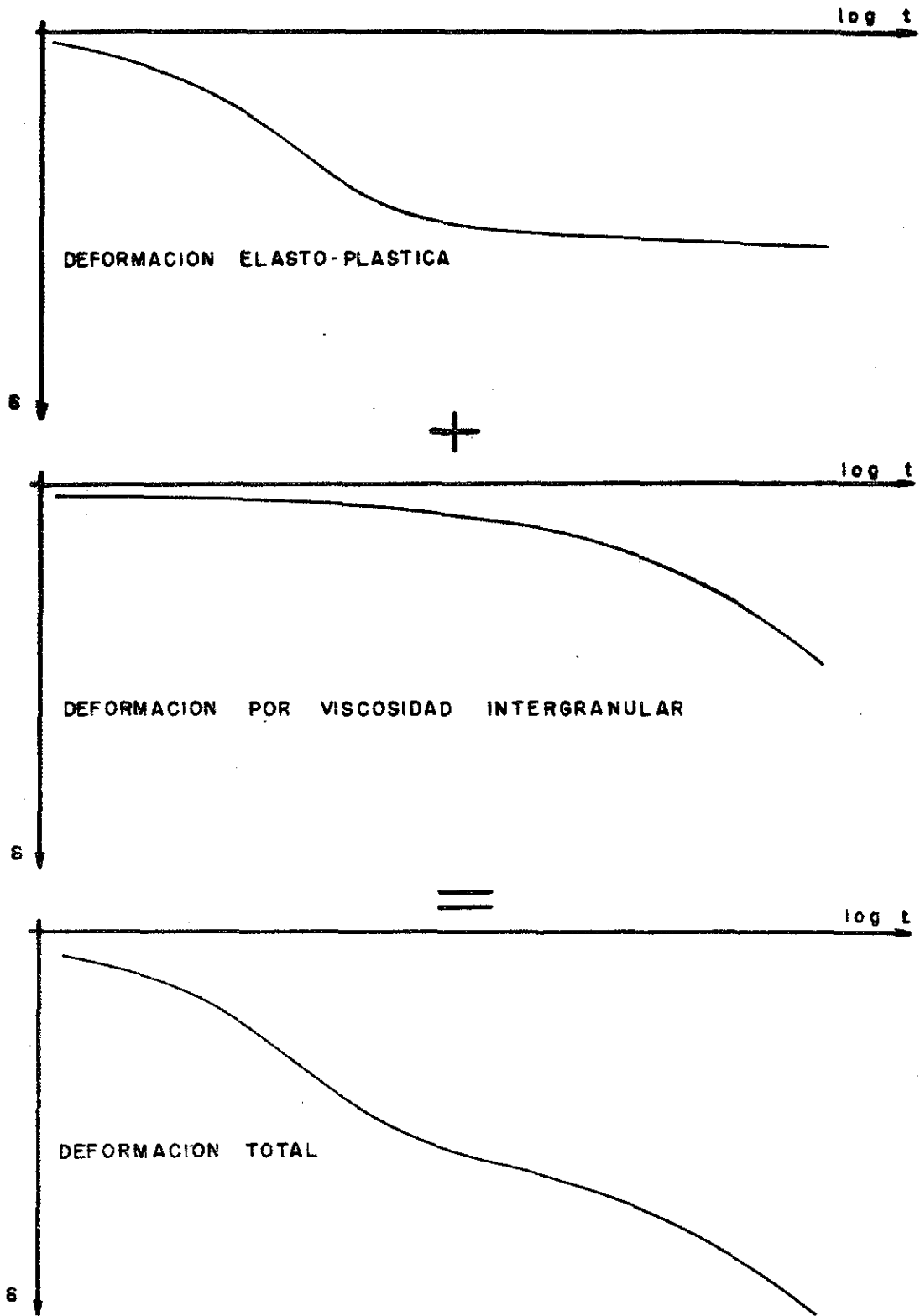


Fig. 7 Componentes de la deformación del suelo en el proceso de consolidación

El valor de S_{ep} (deformación elasto-plástica) se calcula como:

$$S_{ep} = S_B - C_t \log \left(1 + \frac{t_B}{L} \right) \quad \text{----- (10)}$$

Como primera aproximación para el valor de C_v , se utiliza

$$\frac{S_{ep}}{2} \approx S_{50}$$

y se encuentra un valor de t_{50} que corresponde al 50 % de la compresión primaria, de donde:

$$C_v = \frac{0.2 H^2}{t_{50}} \quad \text{----- (11)}$$

Se calcula

$$\xi = \frac{H^2}{L C_v} \quad \text{----- (12)}$$

y se calcula un nuevo valor de S_{50} con la expresión:

$$S_{50} = \frac{1}{2} S_{ep} + C_t \log (1 + 0.2 \xi) \quad \text{----- (13)}$$

Con este valor se calculan de nuevo C_v , ξ . La iteración - se repite hasta que los valores de C_v , ξ ya no cambien sustancialmente.

Una vez definido C_v , se calcula el valor de T_{vB} y de $F(T_{vB})$ en el punto B. El valor de $F(T_{vB})$ deberá ser aproximadamente 2, ya que se ha supuesto que en este punto termina la consolidación primaria. Si esto no ocurre, será necesario definir un nuevo punto B y repetir la secuencia.

Finalmente, los parámetros que intervienen en la Teoría se calculan con las siguientes expresiones:

$$m_{ep} = \frac{\xi_{ep}}{2H \cdot \Delta\sigma} \quad \text{----- (14)}$$

$$m_t = \frac{C_t}{2H \cdot \Delta\sigma} \quad \text{----- (15)}$$

$$\beta = m_t / m_{ep} \quad \text{----- (16)}$$

C_v , ξ ya obtenidos durante el procedimiento de cálculo descrito.

Es conveniente señalar que para su utilización para fines prácticos, el procedimiento anterior puede programarse fácilmente en una computadora personal.

VI.- INTERPRETACION DE LAS PRUEBAS

Para ilustrar el comportamiento de la arcilla típica del Valle de México en el odómetro, se efectuaron 3 pruebas a profundidades de 13.0 , 26.0 y 30.5 m, obtenidas de un sondeo en la zona del lago. Las muestras fueron extraídas con tubos shelby de 4" de diámetro y fueron labradas en anillos de 3" de diámetro y 2 cm. de espesor. Estas dimensiones fueron seleccionadas tomando en cuenta los factores mencionados en el Capítulo IV.

En el interior del anillo se aplicó una capa delgada de grasa repelente para disminuir el efecto negativo de la fricción lateral.

La clasificación y propiedades índice de las muestras ensayadas se presenta en la Tabla 1. Además, se determinó la resistencia en compresión no confinada (q_u) en probetas labradas en el material cercano a las pruebas en el odómetro, Tabla 1.

En las Figs. 8, 9 y 10 se presentan las curvas de compresibilidad σ vs. ϵ_v en escala aritmética, para las 3 pruebas realizadas.

En el anexo B se presentan las curvas de consolidación en escala semilogarítmica, de las cuales se obtuvieron las curvas de variación de los parámetros que aparecen en las Figs. 11, 12 y 13.

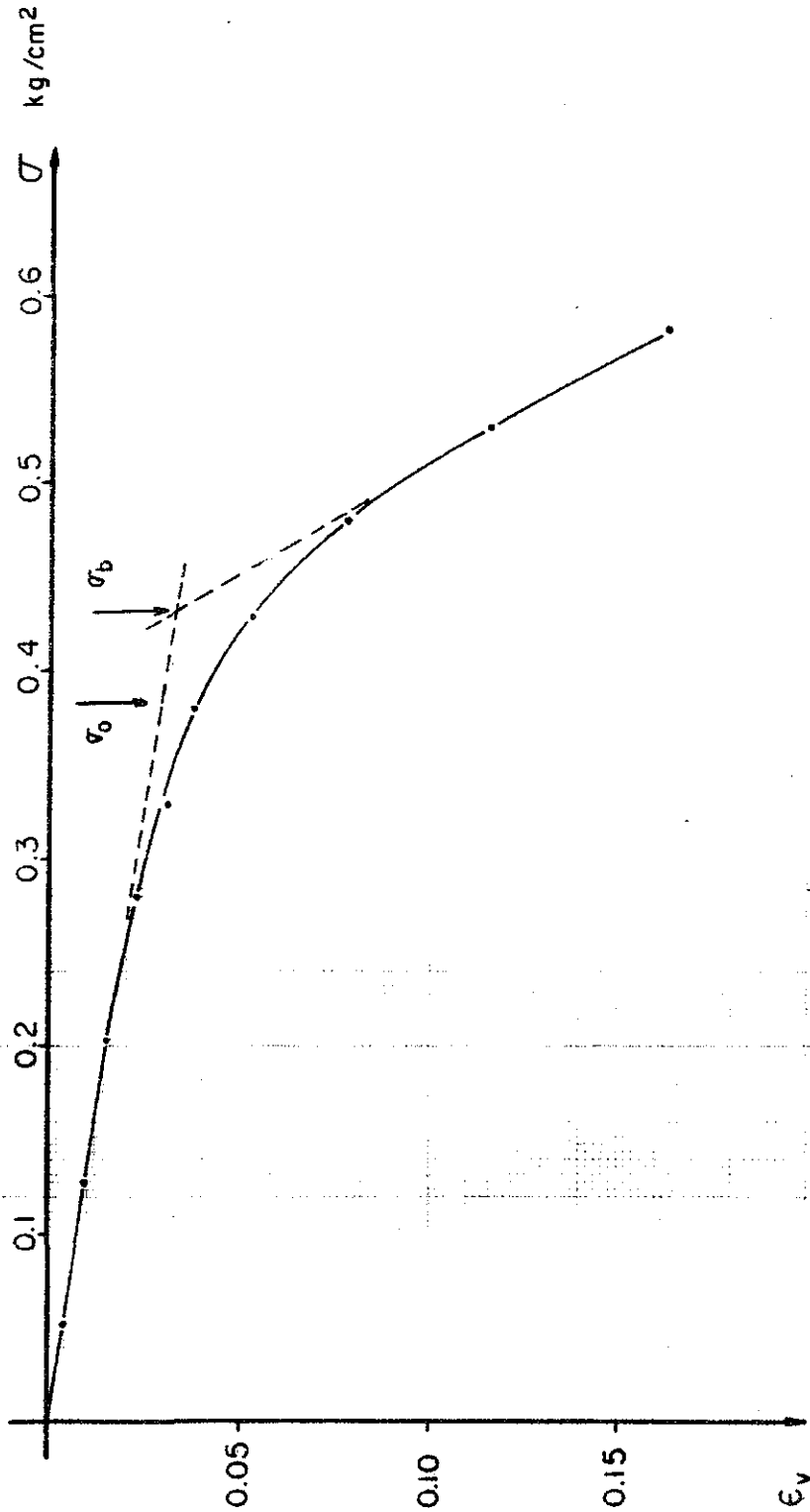
La interpretación se efectuó de acuerdo al procedimiento des

PROF m	CLASIFICACION	γ_m t/m ³	w % Cu	w % qu	Ss -	e -	S %	σ_0 kg/cm ²	σ_b kg/cm ²	q_u kg/cm ²	$\frac{q_u}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_b}{q_u}$
13.0	Arcilla limosa café oscuro con vetas café rojizo	1.184	236	252	2.859	7.055	95.0	0.38	0.428	0.36	0.95	1.19
26.0	Arcilla limosa verde olivo con vetas verde olivo claro	1.236	187	208	2.658	5.175	96.2	0.75	0.835	0.64	0.85	1.30
30.5	Arcilla limosa gris olivo oscuro	1.215	242	212	2.786	6.642	96.6	1.06	1.30	0.95	0.88	1.37

Tabla 1. Propiedades de las muestras ensayadas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CURVA DE COMPRESIBILIDAD



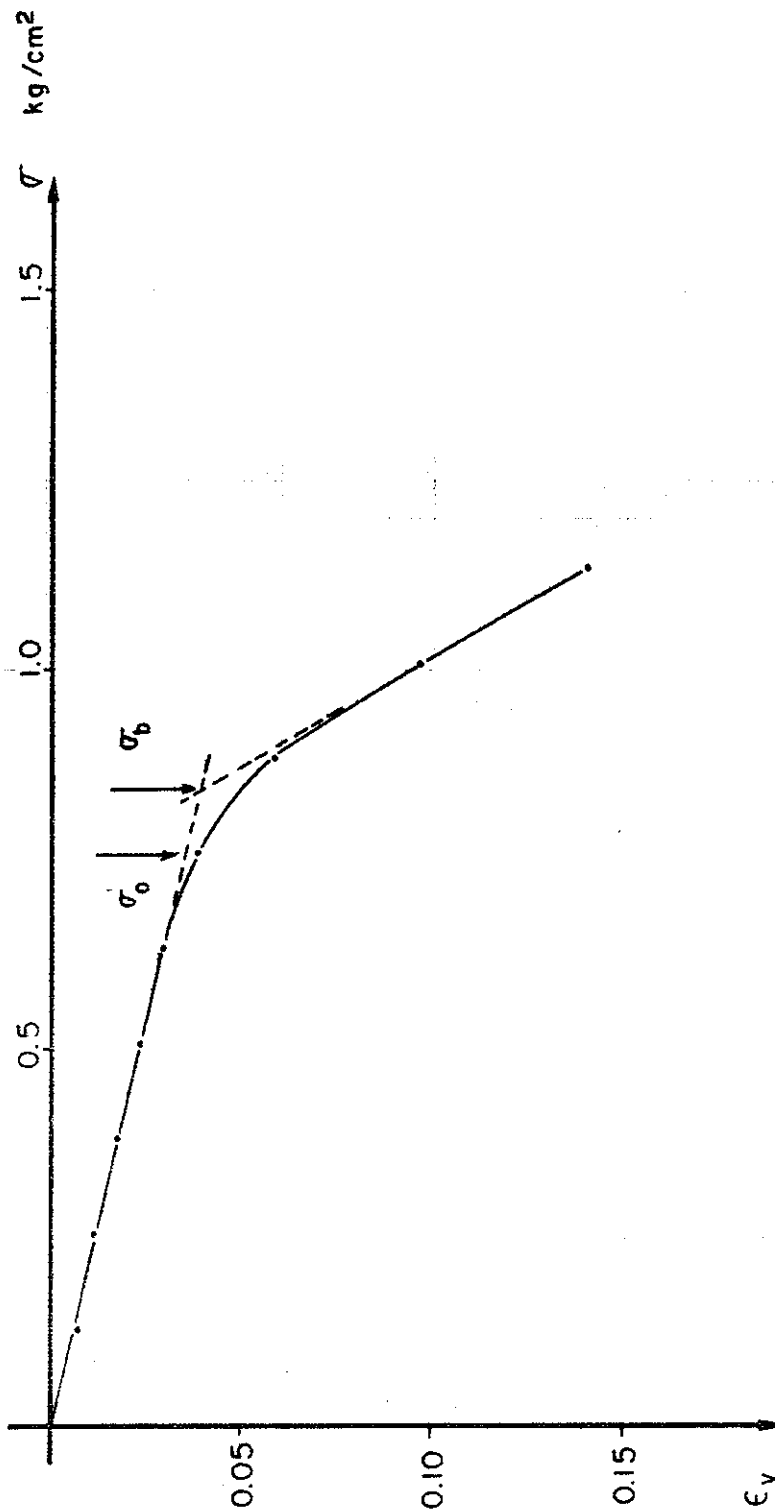
PROF.	13.0	σ_0 / kg/cm ²	0.36	σ_b / kg/cm ²	0.428	q_u / kg/cm ²	0.36	w %	236
-------	------	---------------------------------	------	---------------------------------	-------	----------------------------	------	-----	-----

CLASIFICACION DEL MATERIAL
 Arcilla limosa café oscuro con
 vetas café rojizo

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Fig. 8

CURVA DE COMPRESIBILIDAD



CLASIFICACION DEL MATERIAL

PROF. m. 26.0

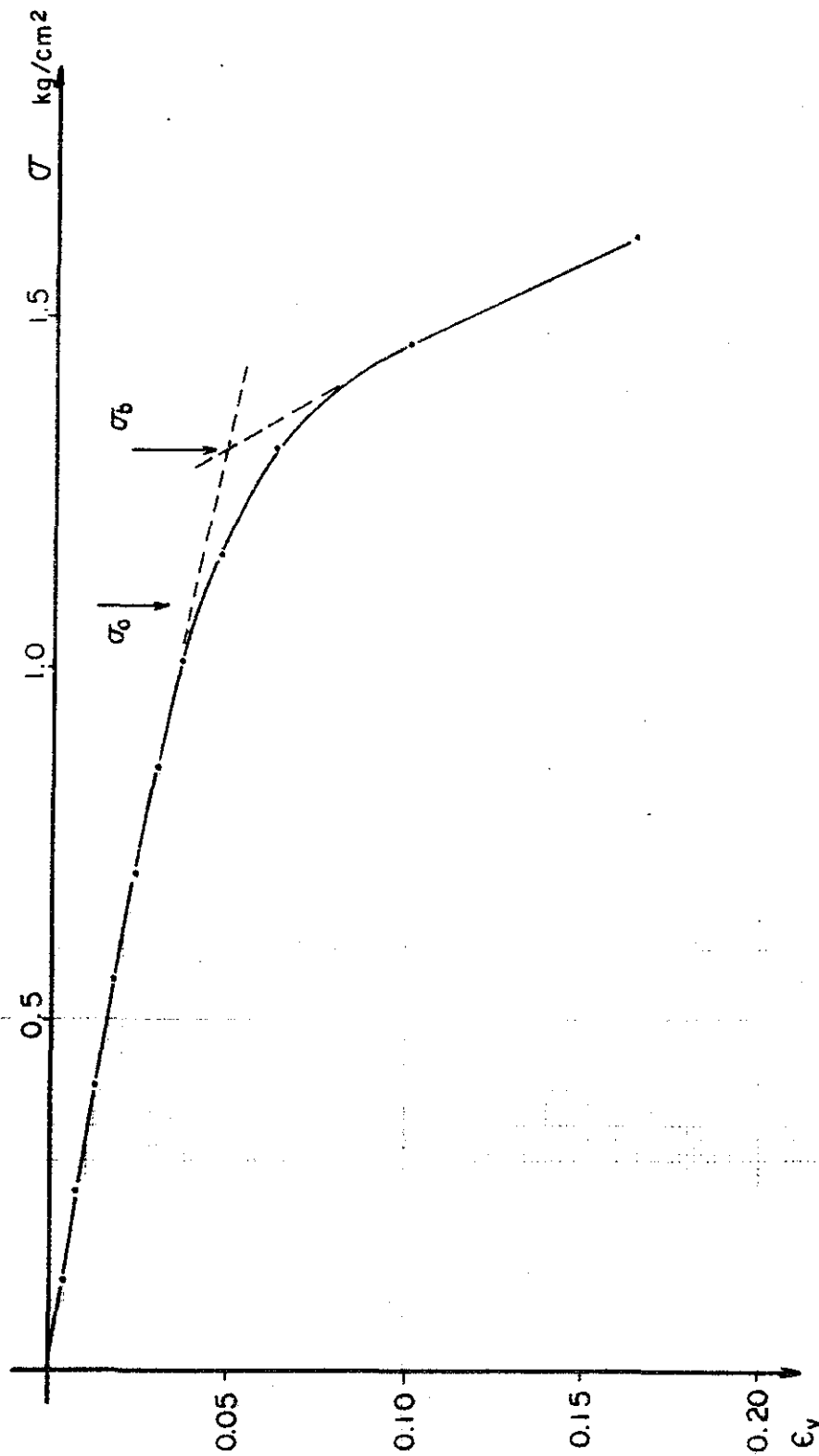
Arcilla Ilmesa verde olivo

σ_0	q_u	w %
kg/cm^2	kg/cm^2	
0.75	0.64	187
σ_b		
kg/cm^2		
0.835		

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 9

CURVA DE COMPRESIBILIDAD



PROF. m	CLASIFICACION DEL MATERIAL	σ_0 kg/cm ²	σ_b kg/cm ²	q_u kg/cm ²	w %
30.5	Arcilla limosa gris olivo oscuro	1.08	1.30	0.95	242

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 10

crito en el Capítulo V. Se efectuó para todas las curvas de consolidación obtenidas de cada prueba, para poder determinar la variación de los parámetros para esfuerzos menores, cercanos y mayores que el esfuerzo crítico .

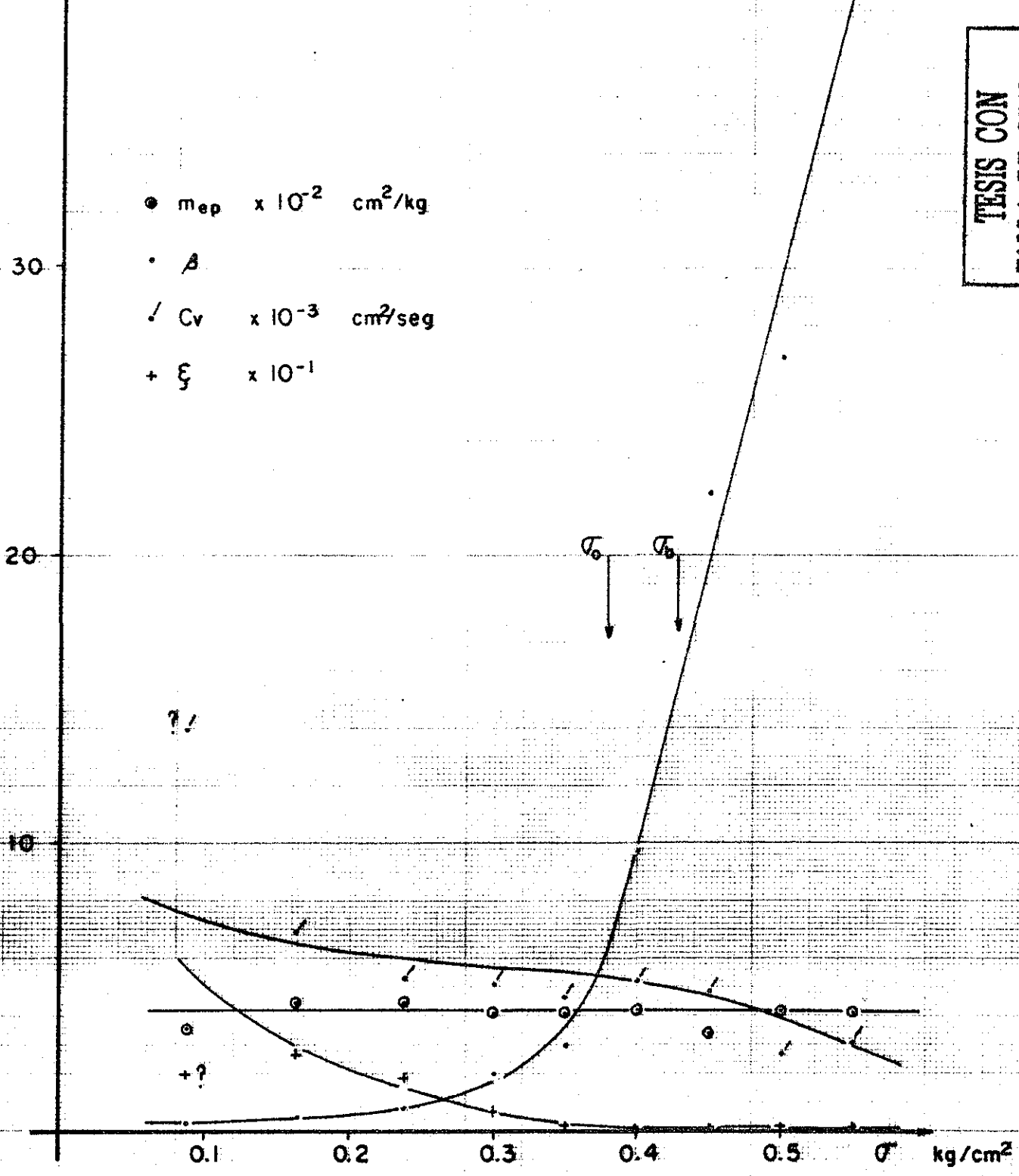
En las 3 curvas de compresibilidad se observa un comportamiento lineal prácticamente hasta el esfuerzo efectivo de campo σ_0 . A partir de este esfuerzo la deformación aumenta gradualmente, hasta llegar al quiebre definido por el esfuerzo crítico, el cual se determina de la siguiente forma: se extienden las dos ramas de la curva siguiendo su propia curvatura, el punto de cruce que corresponde a la curvatura máxima de la curva es el esfuerzo crítico .

Respecto a la variación de los parámetros, Figs. 11, 12 y 13 puede observarse lo siguiente:

- a) El valor de m_{ep} se mantiene prácticamente constante, es decir, es independiente del nivel de esfuerzos.
- b) El valor de β se incrementa ligeramente para esfuerzos menores a σ_0 . A partir de este esfuerzo la variación aumenta, llegando a alcanzar valores tan altos como 40, una vez que se pasó el esfuerzo crítico, lo que da una idea muy clara de la importancia que tiene la viscosidad-intergranular en el comportamiento del suelo.
- c) El valor de C_v tiende a disminuir al acercarse al esfuerzo crítico, a partir del cual la disminución se incrementa sensiblemente, implicando el remoldeo que sufre el material al romperse su estructura, volviéndose más impermeable.

CURVAS DE PARAMETROS DE CONSOLIDACION

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

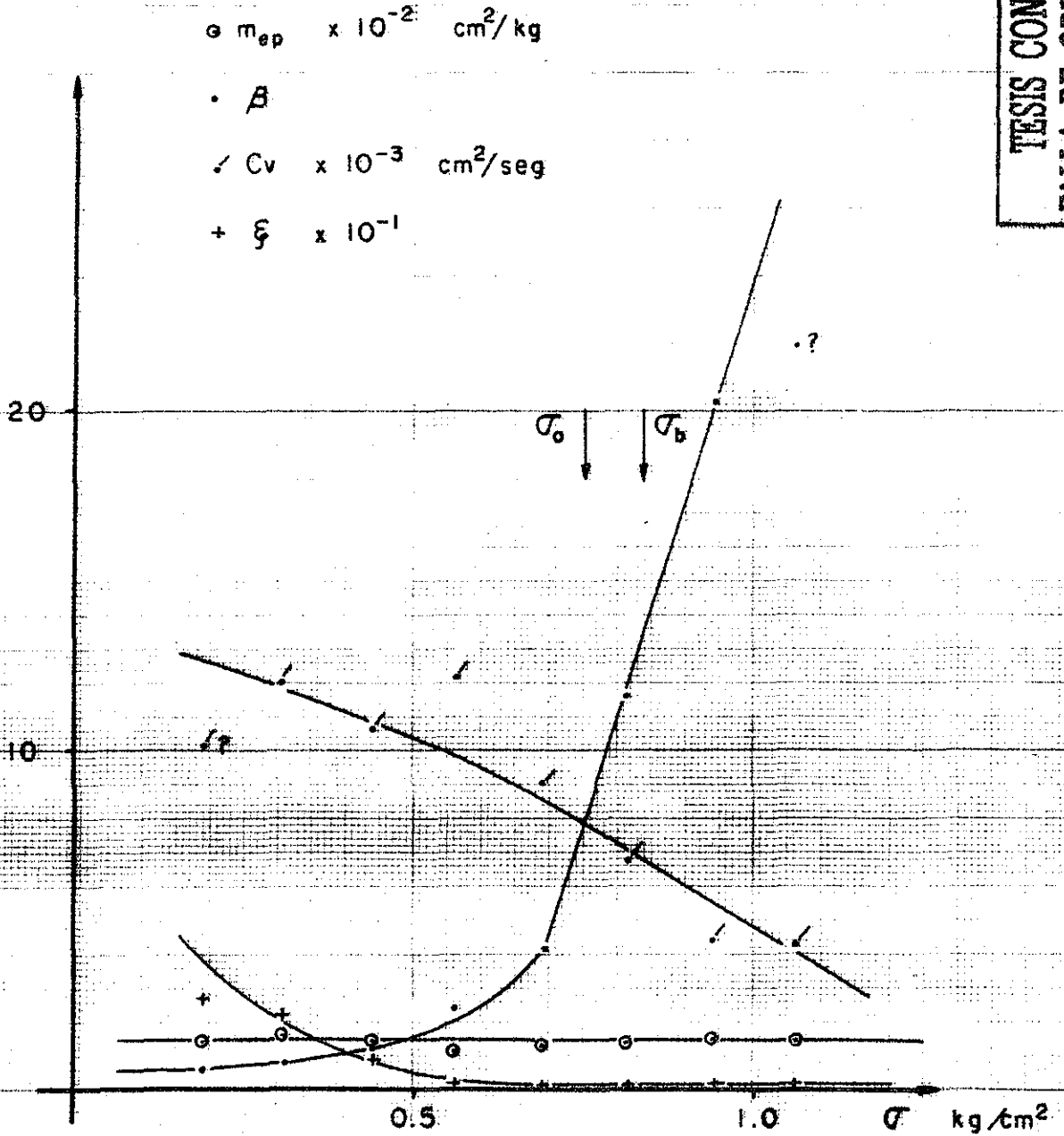


PROF. m	CLASIFICACION DEL MATERIAL	σ_0 kg/cm ²	σ_b kg/cm ²
13.0	Archilla limosa café oscuro con vetas café rojizo	0.38	0.428

Fig. II

CURVAS DE PARAMETROS DE CONSOLIDACION

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



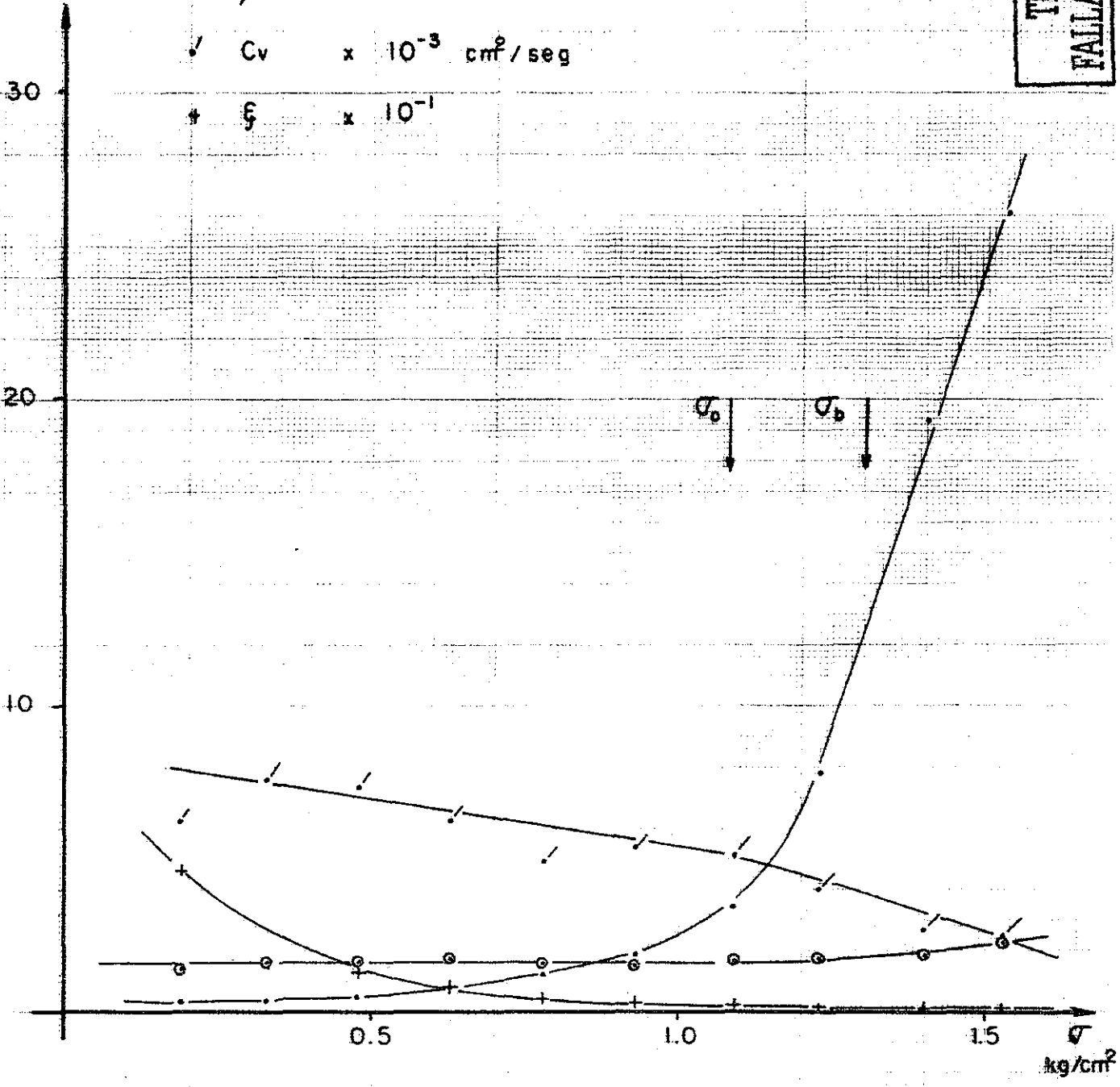
PROF.	CLASIFICACION DEL MATERIAL	σ_0 kg/cm ²	σ_b kg/cm ²
26.0	Arcilla limosa verde olivo	0.75	0.935

Fig. 12

CURVAS DE PARAMETROS DE CONSOLIDACION

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

- o $m_{ep} \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}$
- β
- ✓ $C_v \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$
- + $\xi \times 10^{-1}$



PROF. m	CLASIFICACION DEL MATERIAL	σ_0 kg/cm^2	σ_b kg/cm^2
30.5	Arcilla limosa gris olivo oscuro	1.08	1.30

Fig. 13

d) El valor de ξ disminuye rápidamente para esfuerzos menores al esfuerzo de campo σ_0 , para después tender a un valor límite, después de pasar el esfuerzo crítico.

Nótese que la consistencia en la variación de los parámetros-comprueba la efectividad de realizar las pruebas con pequeños incrementos iguales.

Finalmente, de las curvas de consolidación presentadas en el-Anexo B, puede observarse que los puntos teóricos prácticamente concuerdan con los puntos observados, tanto para esfuerzos menores como mayores al esfuerzo crítico. Es decir, la teo--ría empleada permite definir el comportamiento esfuerzo-defor-mación-tiempo de la arcilla típica del Valle de México con suficiente precisión para fines prácticos.

VII.- C O N C L U S I O N E S

La arcilla del Valle de México es un material de propiedades-singulares. Con contenidos de agua de hasta 400 %, presenta-sin embargo un comportamiento elástico notable para valores -cercanos a su resistencia. Su compresibilidad es alta aún en el tramo de recompresión y, extremadamente alta si se llega -a pasar el esfuerzo crítico σ_b . Para diseño se deberá considerar que el incremento neto de esfuerzos sea una fracción-de la diferencia entre σ_b y σ_0 , para evitar hundimientos --que pongan en peligro la estabilidad de las construcciones o--que impliquen deficiencias en la operación y funcionalidad de las cimentaciones.

d) El valor de ξ disminuye rápidamente para esfuerzos menores al esfuerzo de campo σ_0 , para después tender a un valor límite, después de pasar el esfuerzo crítico.

Nótese que la consistencia en la variación de los parámetros-comprueba la efectividad de realizar las pruebas con pequeños incrementos iguales.

Finalmente, de las curvas de consolidación presentadas en el-Anexo B, puede observarse que los puntos teóricos prácticamente concuerdan con los puntos observados, tanto para esfuerzos menores como mayores al esfuerzo crítico. Es decir, la teo--ría empleada permite definir el comportamiento esfuerzo-defor-mación-tiempo de la arcilla típica del Valle de México con suficiente precisión para fines prácticos.

VII.- C O N C L U S I O N E S

La arcilla del Valle de México es un material de propiedades-singulares. Con contenidos de agua de hasta 400 %, presenta-sin embargo un comportamiento elástico notable para valores -cercanos a su resistencia. Su compresibilidad es alta aún en el tramo de recompresión y, extremadamente alta si se llega -a pasar el esfuerzo crítico σ_b . Para diseño se deberá considerar que el incremento neto de esfuerzos sea una fracción-de la diferencia entre σ_b y σ_0 , para evitar hundimientos --que pongan en peligro la estabilidad de las construcciones o--que impliquen deficiencias en la operación y funcionalidad de las cimentaciones.

En la arcilla de la Ciudad de México pueden distinguirse dos tipos de resistencias: la resistencia definida por el esfuerzo crítico σ_b en el odómetro y la resistencia en compresión no confinada. La relación entre ambas resistencias, definida por σ_b/q_u varía entre 1.35 y 1.50.

En su comportamiento mecánico el suelo estudiado exhibe dos fenómenos de suma importancia: el fenómeno de endurecimiento o solidificación y el fenómeno de viscosidad intergranular. Por el primero, la arcilla aparenta el efecto de una preconsolidación que no ha experimentado y, por el segundo, presenta deformaciones viscosas diferidas que deben tomarse en cuenta al predecir la evolución con el tiempo del asentamiento de una cimentación.

La Teoría de consolidación de Terzaghi no es aplicable por sí sola en suelos que exhiben viscosidad intergranular. En estos casos, la Teoría de Zeevaert (Ref. 6) empleada en este trabajo, se convierte en una herramienta eficiente para la interpretación del comportamiento mecánico del material.

Finalmente, al revisar la variación de los parámetros con el nivel de esfuerzos, puede resumirse la importancia del concepto de esfuerzo crítico. De principal interés es observar que el valor de β puede aumentar de entre 4 y 8 antes de σ_o , a 30 o 40 después de σ_b . Es decir, que la magnitud del fenómeno secundario se excede de toda posibilidad de control una vez que se ha pasado el esfuerzo crítico.

R E F E R E N C I A S

- 1.- FOUNDATION ENGINEERING FOR DIFFICULT SUBSOIL CONDITIONS. Leonardo Zeevaert. Second Edition. Van Nostrand Reinhold Co. 1983. Capítulo V.
- 2.- THE LACUSTRINE CLAYS OF THE VALLEY OF MEXICO. R.J. Marsal. Contribution of the Instituto de Ingeniería to the 1975 International Clay Conference. Instituto de Ingeniería U.N.A.M. 1975.
- 3.- LOC. CIT. Ref. 1 Capítulo II.
- 4.- CONDICIONES AMBIENTALES EN EL DISEÑO DE LA CIMENTACION DE EDIFICIOS. Leonardo Zeevaert. Séptima Conferencia Nabor - Carrillo. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México 1984.
- 5.- MECANICA DE SUELOS EN LA INGENIERIA PRACTICA. K. Terzaghi, R.B. Peck. Segunda Edición. El Ateneo 1973.
- 6.- CONSOLIDATION IN THE INTERGRANULAR VISCOSITY OF HIGH COMPRESSIBLE SOILS. Leonardo Zeevaert. Symposium on Consolidation Behavior of Soils. (ASTM). Ft. Lauderdale, Florida, 1985
- 7.- SOIL TESTING FOR ENGINEERS. T. William Lambe. John Wiley and Sons, Inc. 1951 Capítulo IX.
- 8.- FACTORES QUE AFECTAN LA PRUEBA DE CONSOLIDACION. FRICCION LATERAL. S.C. Posada Bolívar. Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. -- U. N. A. M. 1985
- 9.- INFLUENCIA DE LOS INCREMENTOS DE ESFUERZO PARA REALIZAR LA PRUEBA DEL ODOMETRO. Li Xiangyue. Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería U.N.A.M. 1985

<p style="text-align: center;">TESIS CON FALLA DE ORIGEN</p>
--

ANEXO A. EJEMPLO DE APLICACION PRACTICA.

Para ejemplificar la utilización de la Teoría de Viscosidad - Intergranular en el cálculo de hundimientos, supóngase el siguiente ejemplo sencillo: Para la construcción de una unidad habitacional se colocará sobre la superficie del terreno natural una capa de 60 cm. de espesor, de material compactado, - con un peso volumétrico de 1.8 t/m^3 . Al efectuar el estudio de Mecánica de Suelos se encontró, entre otros, un estrato de 21.0 a 28.50 m. de profundidad, de arcilla limosa altamente compresible. Este estrato está limitado en sus caras superior e inferior por fronteras permeables.

Para obtener sus parámetros de compresibilidad se efectuó una prueba en el odómetro a 26.0 m. de profundidad y se obtuvo la curva de compresibilidad y las curvas de parámetros indicadas en las Figs. 9 y 12, respectivamente.

Debido a que la unidad abarca un área muy extensa, se considerará que el peso unitario de la plataforma se transmitirá íntegramente hasta esa profundidad, es decir:

$$\Delta \sigma = 1.8 \text{ t/m}^3 \cdot 0.6 \text{ m.} = 1.08 \text{ t/m}^2 = 0.11 \text{ Kg/cm}^2$$

Los parámetros se tomarán para el esfuerzo medio, es decir:

$$\sigma_0 + \frac{\Delta \sigma}{2} = 0.75 + \frac{0.11}{2} = 0.81 \text{ Kg./cm}^2$$

de la Fig. 12, para 0.81 Kg/cm^2 se tienen:

$$\begin{aligned} m_{ep} &= 1.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Kg.} \\ \beta &= 11.6 \\ C_v &= 7.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg.} \\ \xi &= 0.02 \end{aligned}$$

El estrato tiene 7.5 m. de espesor y está drenado por ambas caras, por lo que:

$$H = 375 \text{ cm.}$$

y

$$2H = 750 \text{ cm.}$$

Del inciso II.5, expresión (4) se obtiene:

$$s = \left\{ F(T_v) + \beta \log_{10}(1 + \xi T_v) \right\} \cdot m_{ep} \cdot 2H \cdot \Delta \sigma$$

en donde:

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2} \quad , t \text{ es el tiempo en seg.}$$

Para diferentes tiempos se obtiene:

Meses	t $\times 10^6$ seg.	T_v	$F(T_v)$	S_{ep} cm.	S_{vl} cm.	S_{total} cm.
0.5	1.296	0.065	0.28	0.3	0	0.3
1	2.592	0.131	0.4	0.5	0	0.5
2	5.184	0.262	0.56	0.7	0	0.7
4	10.368	0.523	0.78	1.0	0.1	1.1
8	20.736	1.047	0.93	1.2	0.1	1.3
12	31.104	1.570	0.98	1.2	0.2	1.4
24	62.208	3.141	1	1.2	0.4	1.6
36	93.312	4.711	1	1.2	0.6	1.8
48	124.416	6.282	1	1.2	0.7	1.9
60	155.520	7.852	1	1.2	0.9	2.1
72	186.624	9.422	1	1.2	1.1	2.3
120	311.040	15.704	1	1.2	1.7	2.9
240	622.10	31.409	1	1.2	3.0	4.2

En la Fig. A.1 se graficó el hundimiento calculado para los diferentes tiempos empleados. Puede notarse que la consolidación primaria se verificaría en aproximadamente 1 año,

mientras que en 6 años la magnitud de la deformación por viscosidad intergranular prácticamente iguala a la deformación elastoplástica.

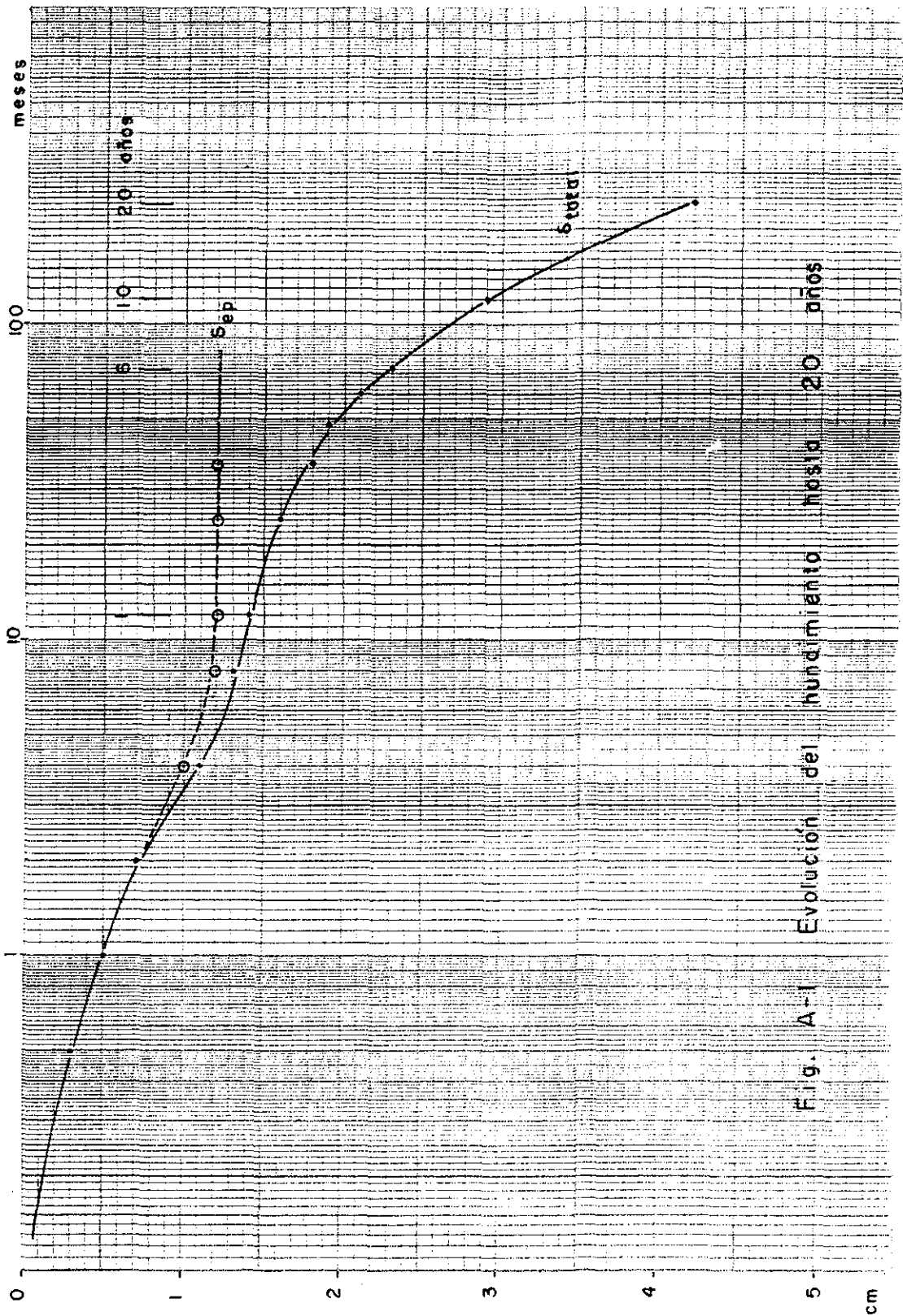
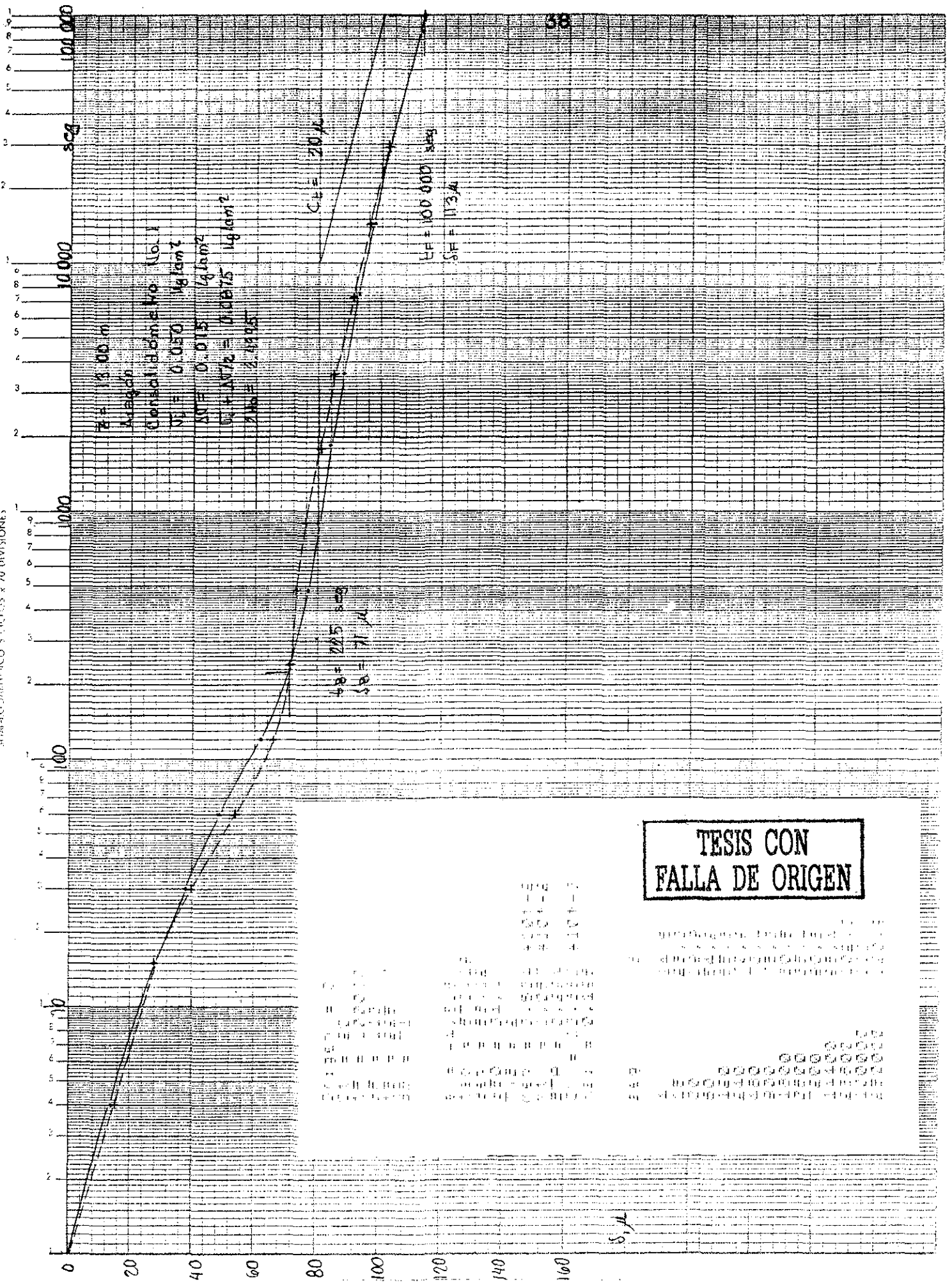


Fig. A-1 Evolución del hundimiento hasta 20 años

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANEXO B.- CURVAS DE CONSOLIDACION INTERPRETADAS PARA
LAS 3 PRUEBAS REALIZADAS.



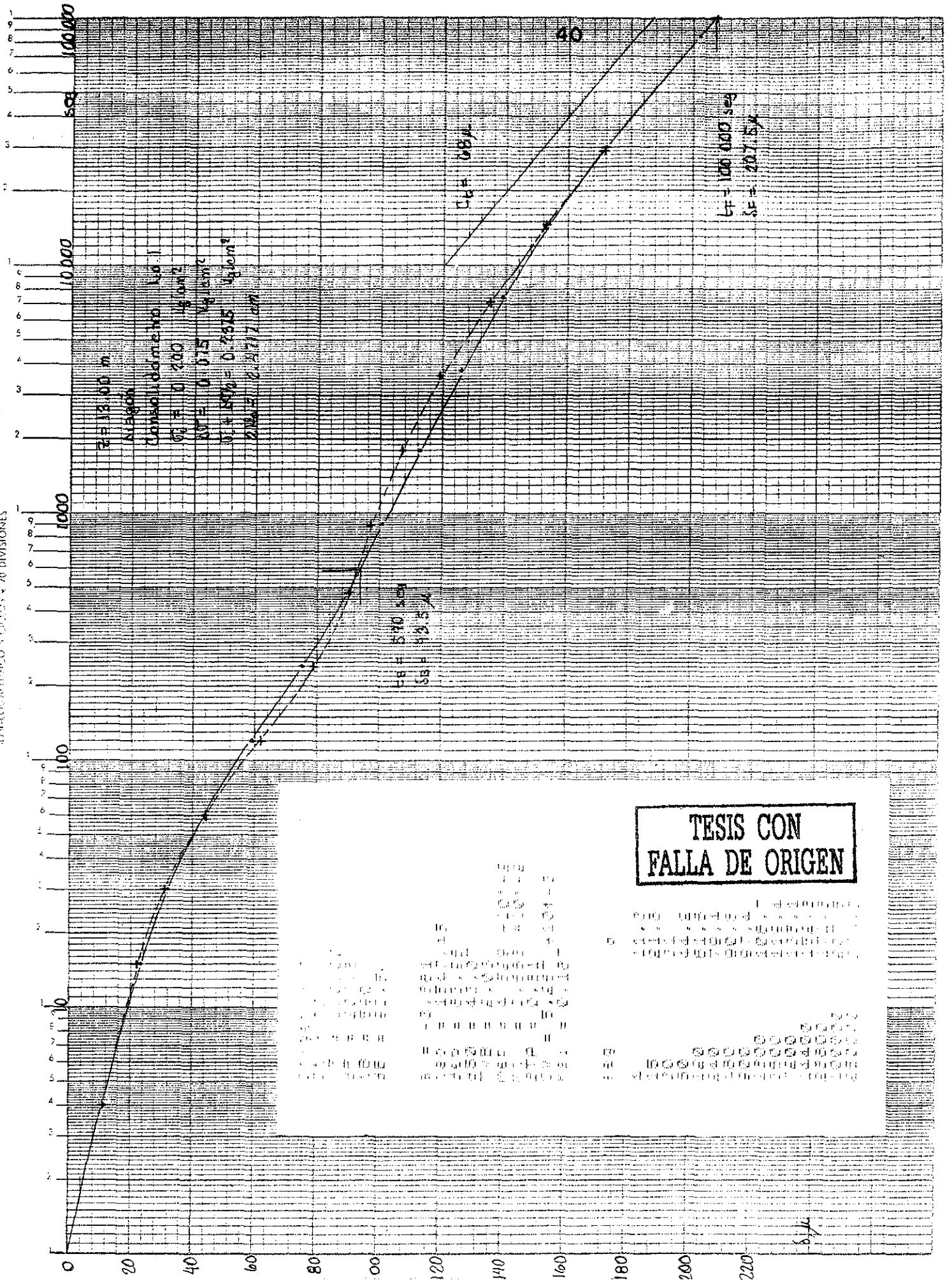
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

El presente informe describe los resultados obtenidos en el estudio de la falla de origen en el sistema de tuberías de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de San José, Costa Rica. El estudio se realizó mediante la aplicación de técnicas de análisis de fallas y se concluyó que la falla se originó debido a la combinación de factores mecánicos y ambientales.

1. Introducción
 2. Objetivos
 3. Metodología
 4. Resultados
 5. Conclusiones
 6. Recomendaciones

El estudio se realizó en el mes de mayo del año 2015, en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de San José, Costa Rica. El estudio se realizó mediante la aplicación de técnicas de análisis de fallas y se concluyó que la falla se originó debido a la combinación de factores mecánicos y ambientales.

5,7

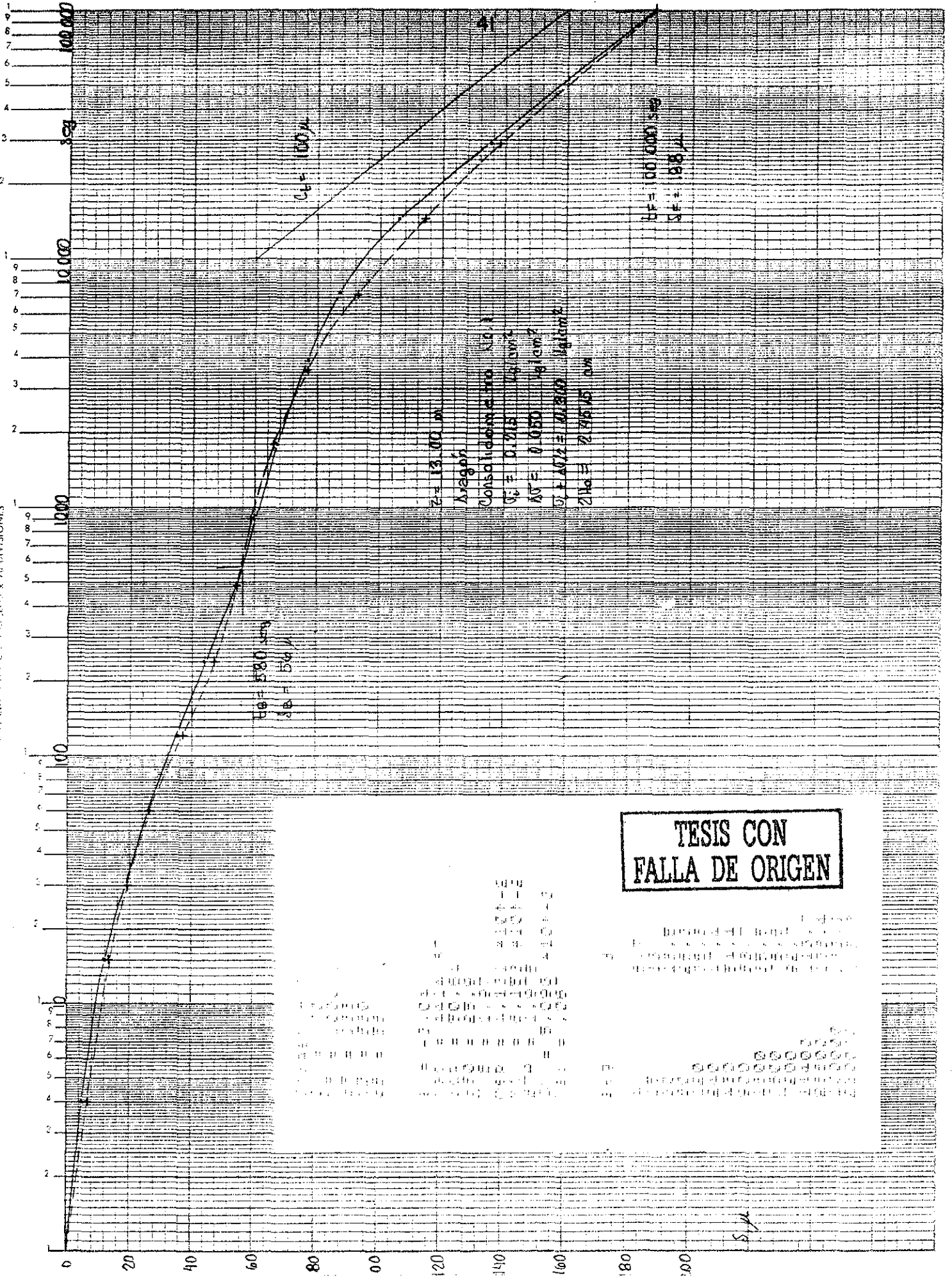


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

El estudio de la consolidación de arcillas y limos es de gran importancia en la ingeniería de suelos, ya que permite determinar el asentamiento que sufrirá un suelo durante el tiempo que transcurre desde su construcción hasta el momento en que se requiere su uso. Este estudio se realizó en el laboratorio de suelos de la Universidad de Zaragoza, utilizando el método de consolidación por carga constante.

El suelo estudiado es una arcilla de origen marino, de tipo CI, con un contenido de agua natural del 75%. Se realizaron ensayos de consolidación por carga constante a diferentes cargas, obteniéndose los resultados que se muestran en el gráfico adjunto. Los datos obtenidos se resumen en el siguiente cuadro:

Carga (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Coeficiente de consolidación (Cv)	Tiempo (seg)
0.2	0.002	0.200	570
0.4	0.004	0.200	570
0.6	0.006	0.200	570
0.8	0.008	0.200	570
1.0	0.010	0.200	570
1.2	0.012	0.200	570
1.4	0.014	0.200	570
1.6	0.016	0.200	570
1.8	0.018	0.200	570
2.0	0.020	0.200	570



$U = 13,000 \text{ cm}$
 Aragon
 Consolidación No. 1
 $U = 0.215 \text{ g/cm}^3$
 $U = 0.050 \text{ g/cm}^3$
 $U = 1.11 \text{ g/cm}^3$
 $U = 2.75 \text{ g/cm}^3$

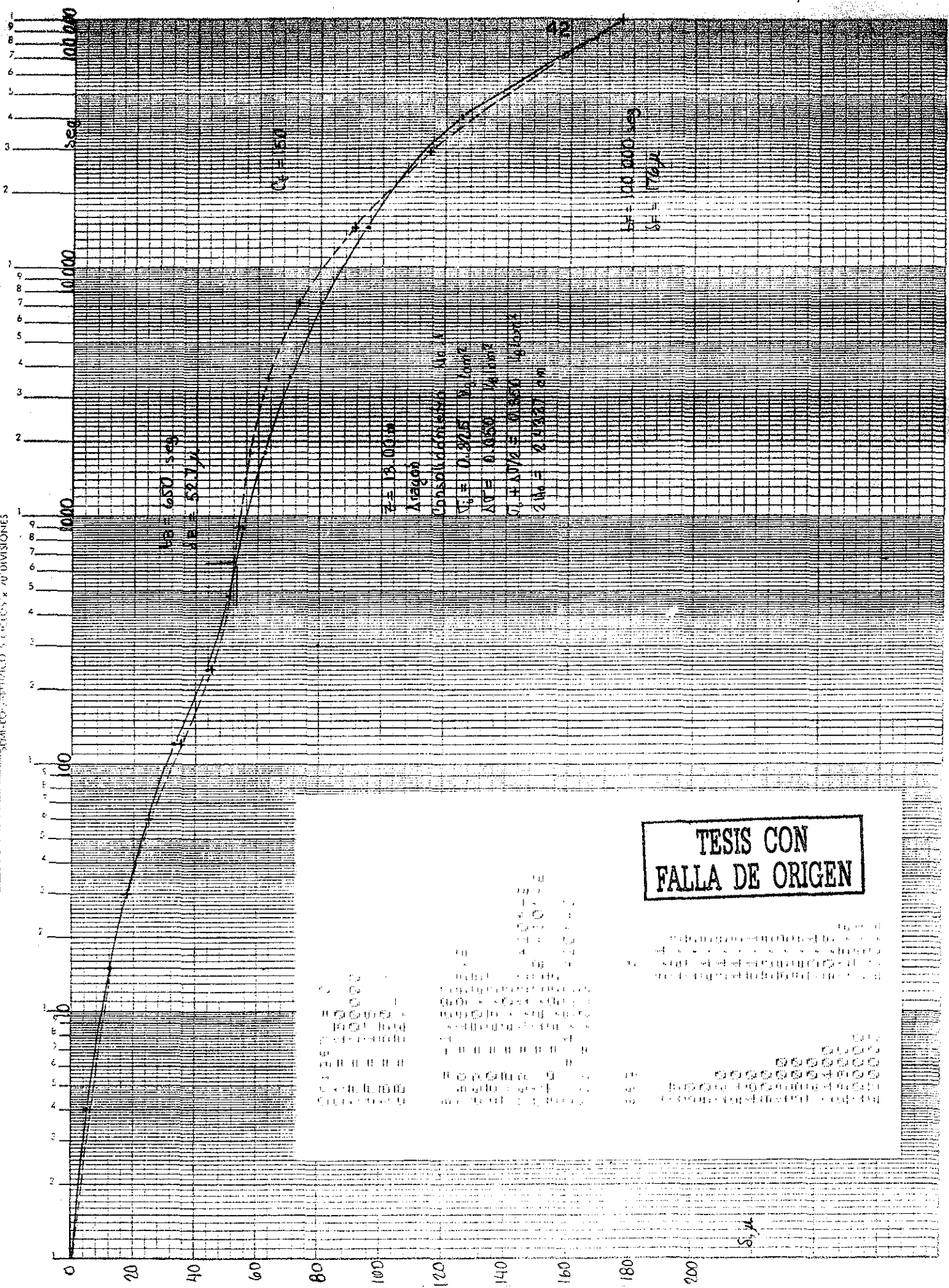
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Instituto de Física y Matemáticas
 Universidad Nacional Autónoma de México
 Ciudad de México, D.F.

Autor: [Illegible]
 Asesor: [Illegible]
 Fecha: [Illegible]

5/4

SEGA-EP-STATISTICO-5-CYCLOS x 40 DIVISIONES

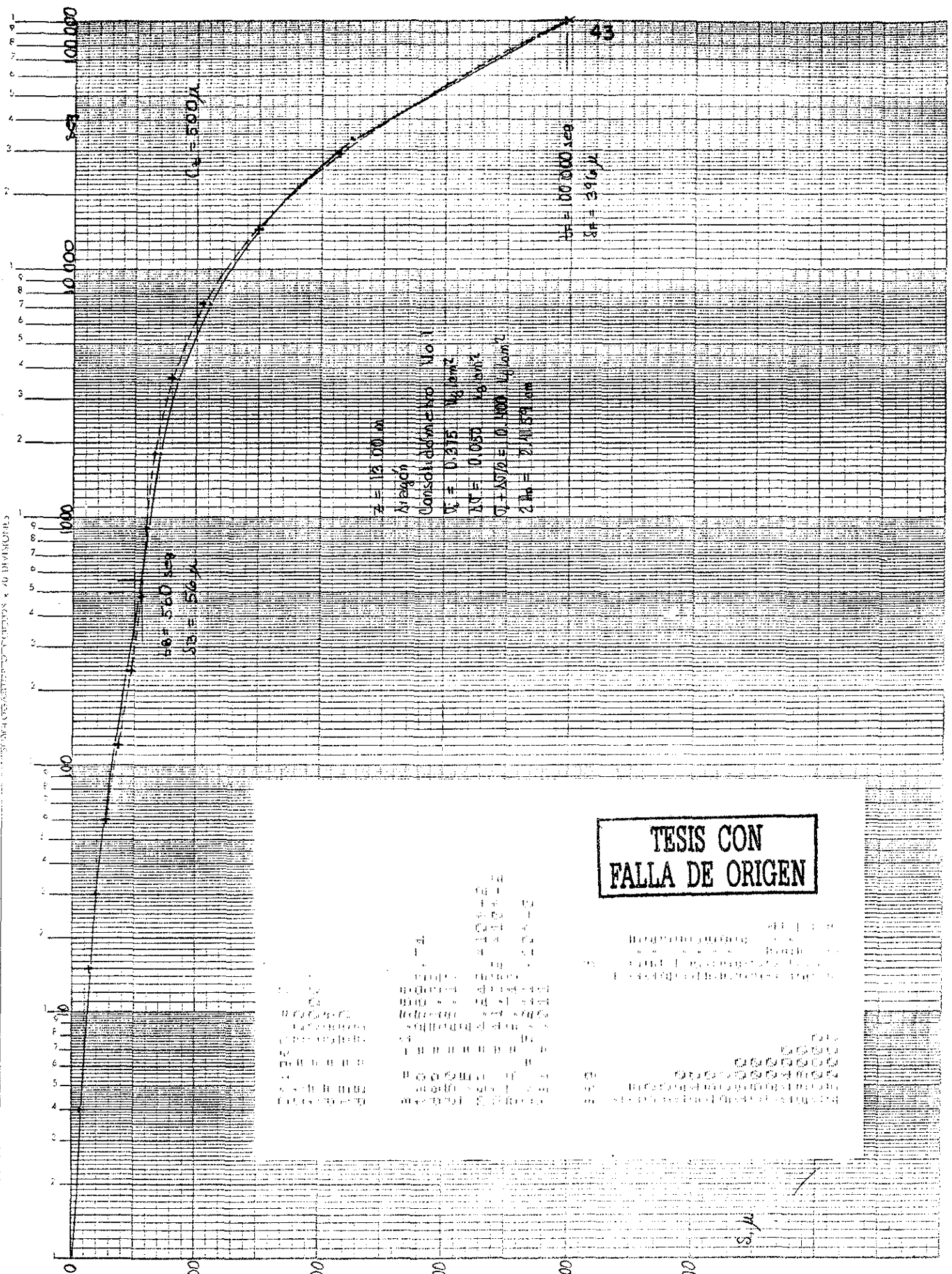


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Este diagrama muestra la evolución de la tensión y la deformación en un material sometido a un ensayo de fatiga. La curva superior representa la tensión aplicada y la curva inferior representa la deformación. El punto A indica el inicio del ensayo, el punto B el momento en que se alcanza la tensión máxima, y el punto C el momento en que ocurre la falla por fatiga. El tiempo de vida a fatiga (LTF) es de 600 segundos. El tiempo de vida a rotura (LTR) es de 527 micrómetros. El tiempo de vida a rotura (LTV) es de 150 micrómetros. El tiempo de vida a rotura (LTV) es de 13.00 micrómetros. El tiempo de vida a rotura (LTV) es de 2.027 micrómetros. El tiempo de vida a rotura (LTV) es de 100.000 segundos. El tiempo de vida a rotura (LTV) es de 76 micrómetros.

5,4

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHILE



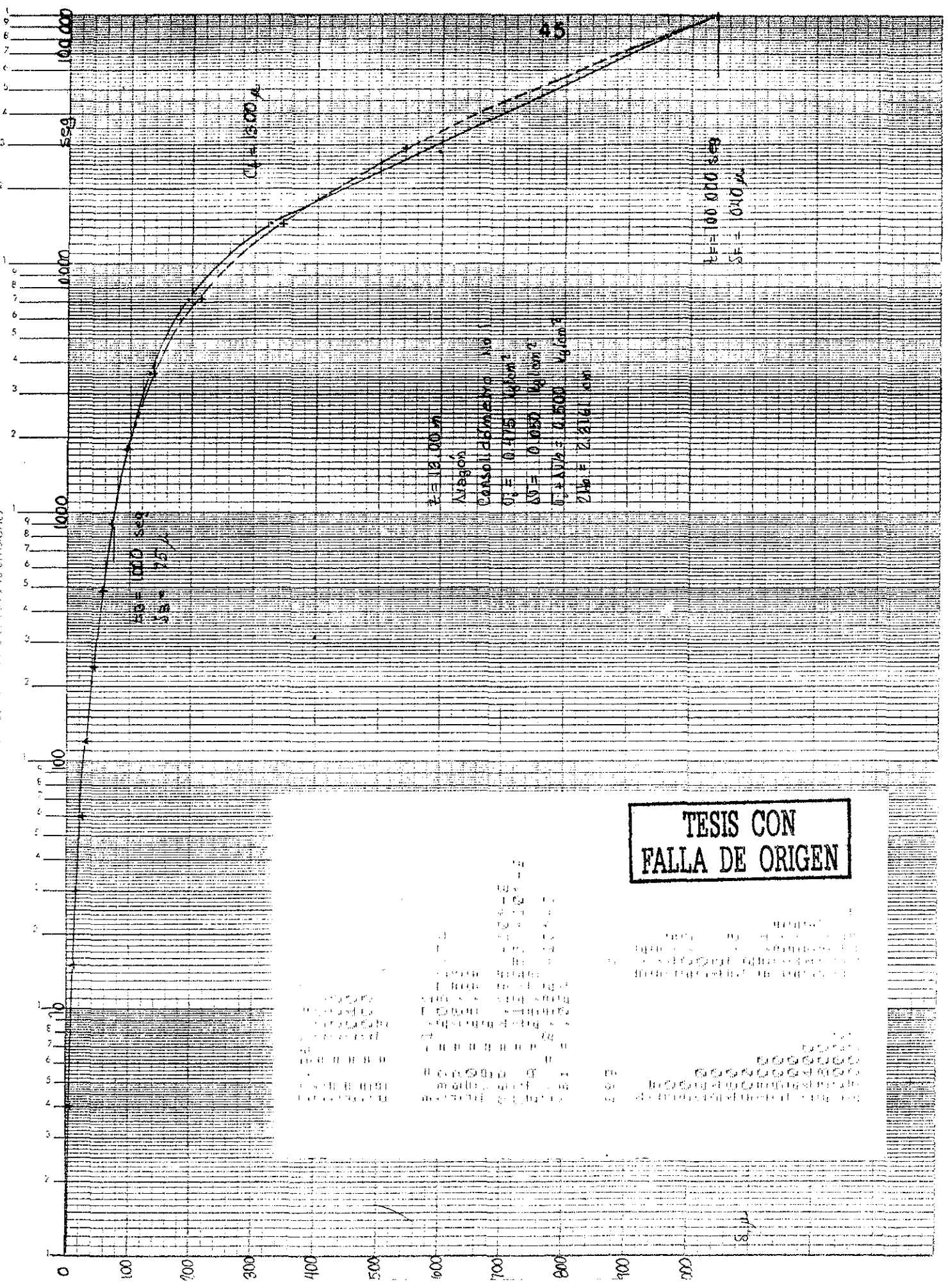
$z = 1200 \text{ m}$
 Arreglo
 Consol. adm. = 10 No. 1
 $V_c = 0.275 \text{ kg/cm}^2$
 $\Delta V = 0.05 \text{ kg/cm}^2$
 $Q = 1500 = 0.0001 \text{ kg/cm}^2$
 $Z_{Ro} = 2.1059 \text{ km}$

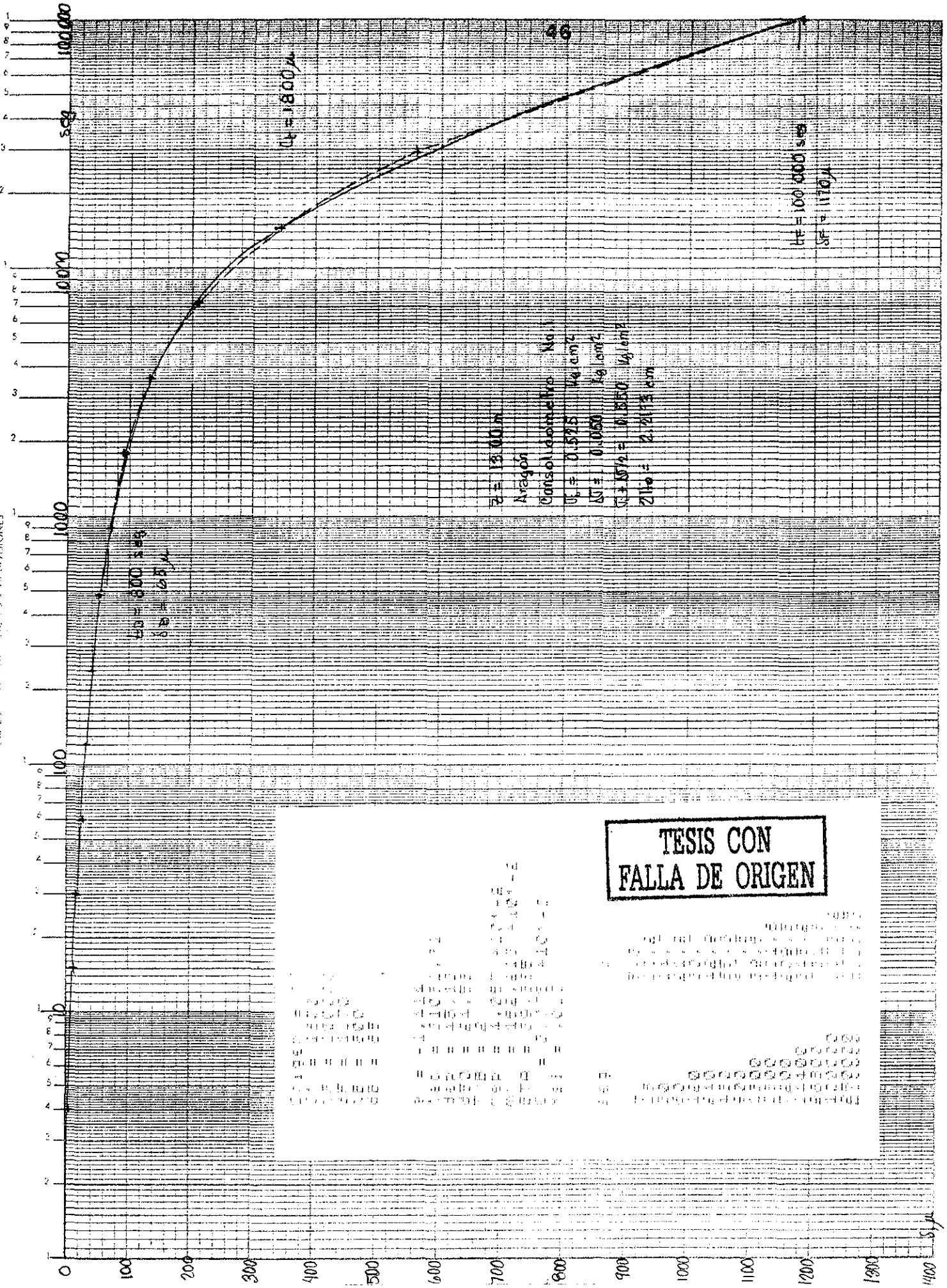
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Autor: ...
 Director: ...
 Asesor: ...

Santiago, Chile
 Año: ...

C:\Users\... \Documents\...





$t_0 = 800 \text{ seg}$
 $\delta_0 = 65 \mu$

$t_1 = 1800 \mu$

$t_2 = 100,000 \text{ seg}$
 $\delta_2 = 1170 \mu$

$Z = 13,000 \mu$
 Aragon
 Consolidómetro No.
 $U_1 = 0.575 \text{ Kg/cm}^2$
 $U_2 = 0.050 \text{ Kg/cm}^2$
 $U_3 = 0.157 = 0.850 \text{ Kg/cm}^2$
 $Z_{110} = 2.2113 \text{ cm}$

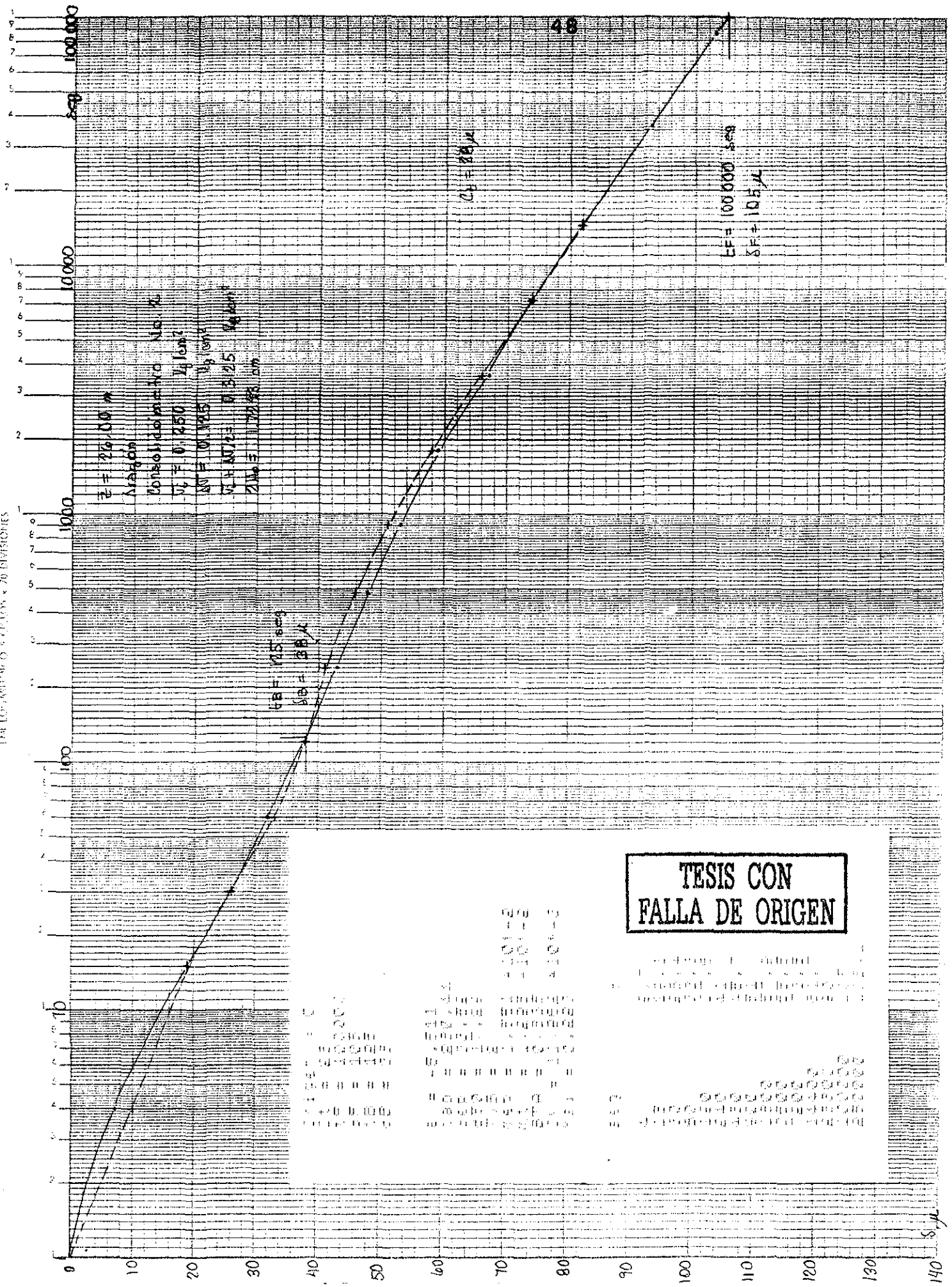
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

El presente informe describe los resultados obtenidos en el estudio de la falla de origen en un sistema de tuberías de alta presión. Se detallan las condiciones de operación, los métodos de medición y los resultados experimentales. Se concluye que la falla ocurre en el punto de máxima tensión, lo que concuerda con las predicciones teóricas basadas en el análisis de elementos finitos.

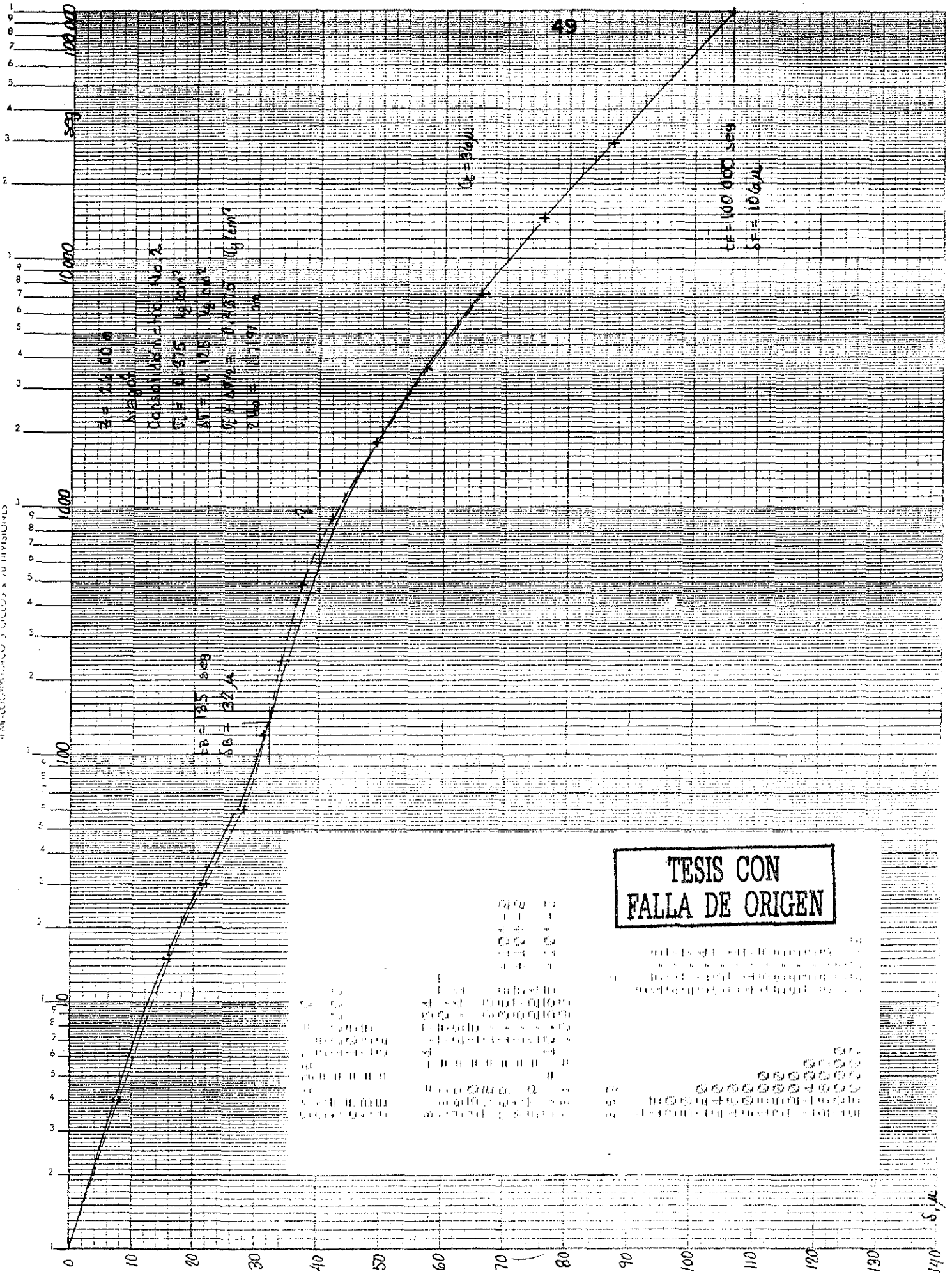
El estudio se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos y Estructuras de la Universidad de Chile. Los datos experimentales fueron recopilados durante un período de seis meses. Se utilizaron tuberías de acero inoxidable de tipo 304, con un diámetro interno de 100 mm y una longitud de 10 m. Las tuberías fueron sometidas a una carga interna de vapor de agua a una temperatura de 150°C y una presión de 10 MPa.

Los resultados muestran que la falla ocurre en el punto de máxima tensión, lo que concuerda con las predicciones teóricas basadas en el análisis de elementos finitos. Se observó que la falla se inició en el punto de máxima tensión y se propagó a lo largo de la tubería. La velocidad de propagación de la falla fue de aproximadamente 100 m/s.

Se concluye que la falla ocurre en el punto de máxima tensión, lo que concuerda con las predicciones teóricas basadas en el análisis de elementos finitos. Se recomienda que se realicen estudios similares para otros tipos de tuberías y condiciones de operación.



Escala: 1 cm = 1000 segundos



$t = 16.00 \text{ seg}$
 Magón
 Correlación No. 2
 $t = 0.375 \text{ seg}$
 $t = 0.105 \text{ seg}$
 $t = 0.075 \text{ seg}$
 $t = 0.05 \text{ seg}$

$t = 13.5 \text{ seg}$
 $t = 32.4$

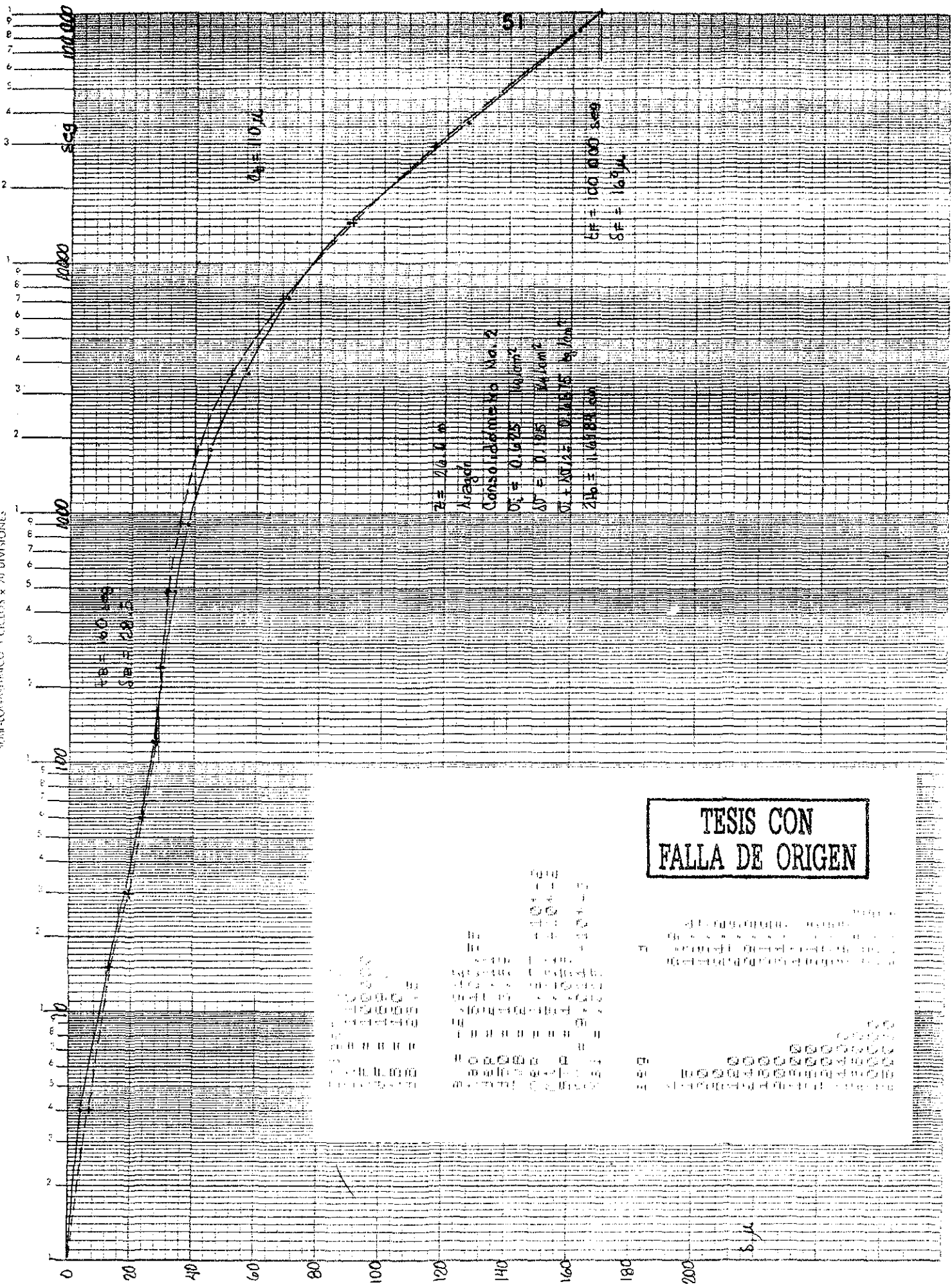
$t = 100 \text{ seg}$

$t = 100.000 \text{ seg}$
 $t = 10.000$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tesis con falla de origen. El tiempo de vida de un componente es el tiempo que transcurre desde que se pone en servicio hasta que falla. Este tiempo puede ser afectado por muchos factores, como el tipo de material, el ambiente de trabajo, el modo de operación, etc. En este caso se estudia el tiempo de vida de un componente que falla por origen.

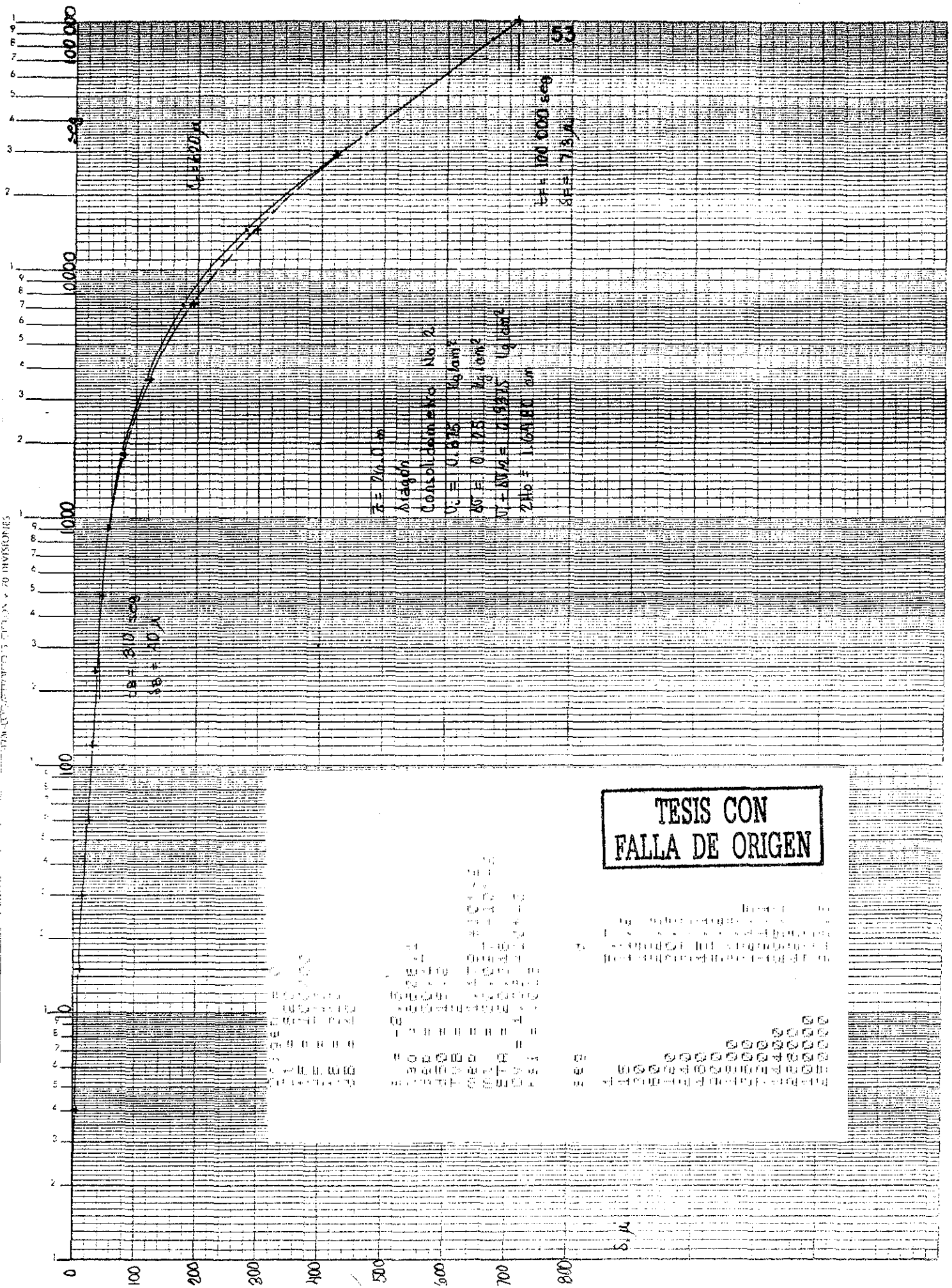
140 5.4



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

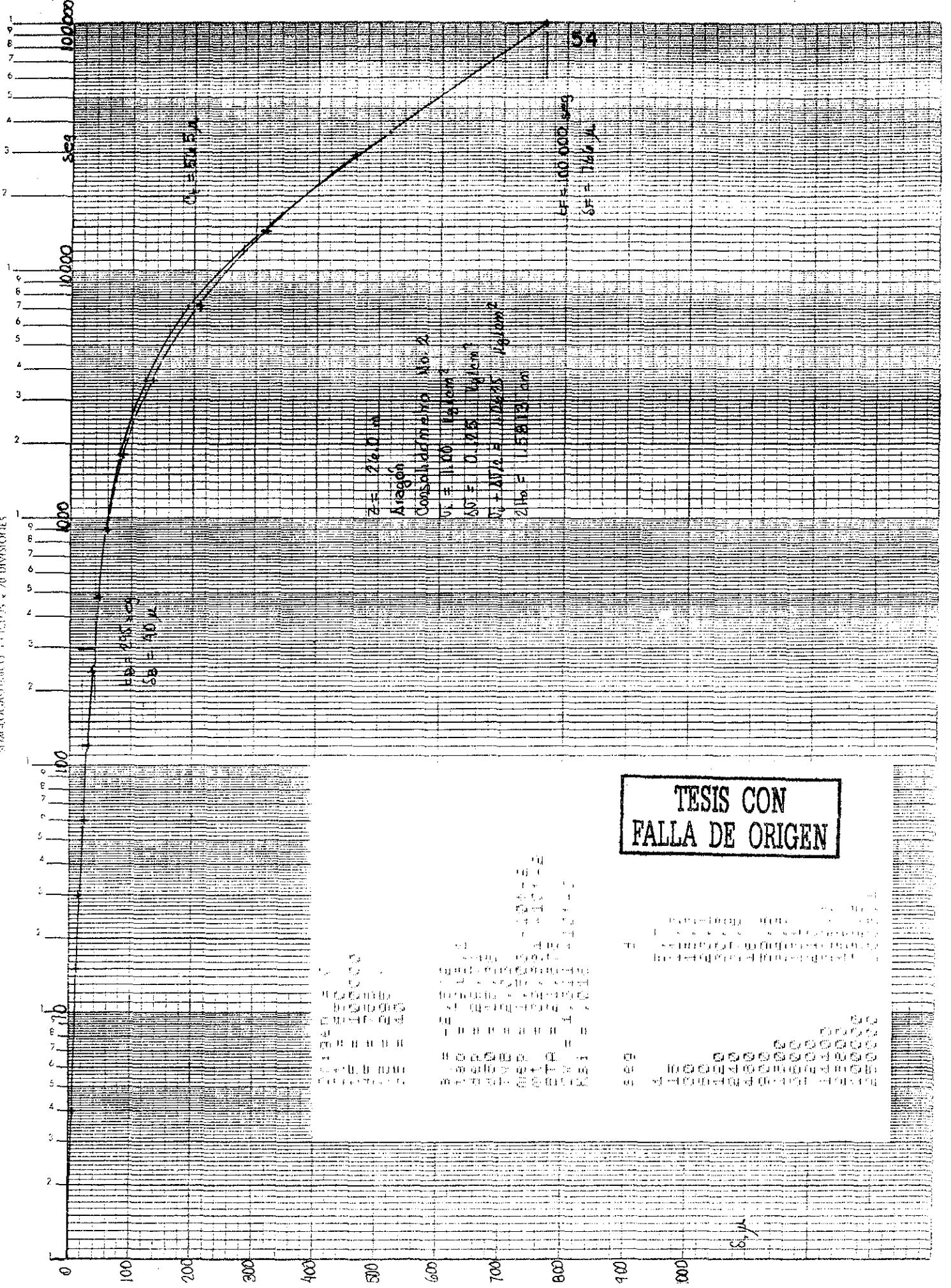
Este documento es una copia de una tesis de grado presentada en el Departamento de Física de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, en el año 1967. El autor es el Sr. Juan Carlos Rodríguez. El título de la tesis es "Tesis con falla de origen". Este documento es propiedad de la Universidad de los Andes y no debe ser reproducido sin el consentimiento expreso de la misma.

PARA LEYER: 25 DIVISIONES Y 50 DIVISIONES



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Introducción
 Capítulo I
 Capítulo II
 Capítulo III
 Capítulo IV
 Capítulo V
 Capítulo VI
 Capítulo VII
 Capítulo VIII
 Capítulo IX
 Capítulo X
 Capítulo XI
 Capítulo XII
 Capítulo XIII
 Capítulo XIV
 Capítulo XV
 Capítulo XVI
 Capítulo XVII
 Capítulo XVIII
 Capítulo XIX
 Capítulo XX
 Capítulo XXI
 Capítulo XXII
 Capítulo XXIII
 Capítulo XXIV
 Capítulo XXV
 Capítulo XXVI
 Capítulo XXVII
 Capítulo XXVIII
 Capítulo XXIX
 Capítulo XXX
 Capítulo XXXI
 Capítulo XXXII
 Capítulo XXXIII
 Capítulo XXXIV
 Capítulo XXXV
 Capítulo XXXVI
 Capítulo XXXVII
 Capítulo XXXVIII
 Capítulo XXXIX
 Capítulo XL
 Capítulo XLI
 Capítulo XLII
 Capítulo XLIII
 Capítulo XLIV
 Capítulo XLV
 Capítulo XLVI
 Capítulo XLVII
 Capítulo XLVIII
 Capítulo XLIX
 Capítulo L
 Capítulo LI
 Capítulo LII
 Capítulo LIII
 Capítulo LIV
 Capítulo LV
 Capítulo LVI
 Capítulo LVII
 Capítulo LVIII
 Capítulo LIX
 Capítulo LX
 Capítulo LXI
 Capítulo LXII
 Capítulo LXIII
 Capítulo LXIV
 Capítulo LXV
 Capítulo LXVI
 Capítulo LXVII
 Capítulo LXVIII
 Capítulo LXIX
 Capítulo LXX
 Capítulo LXXI
 Capítulo LXXII
 Capítulo LXXIII
 Capítulo LXXIV
 Capítulo LXXV
 Capítulo LXXVI
 Capítulo LXXVII
 Capítulo LXXVIII
 Capítulo LXXIX
 Capítulo LXXX
 Capítulo LXXXI
 Capítulo LXXXII
 Capítulo LXXXIII
 Capítulo LXXXIV
 Capítulo LXXXV
 Capítulo LXXXVI
 Capítulo LXXXVII
 Capítulo LXXXVIII
 Capítulo LXXXIX
 Capítulo LXXXX
 Capítulo LXXXXI
 Capítulo LXXXXII
 Capítulo LXXXXIII
 Capítulo LXXXXIV
 Capítulo LXXXXV
 Capítulo LXXXXVI
 Capítulo LXXXXVII
 Capítulo LXXXXVIII
 Capítulo LXXXXIX
 Capítulo LXXXXX

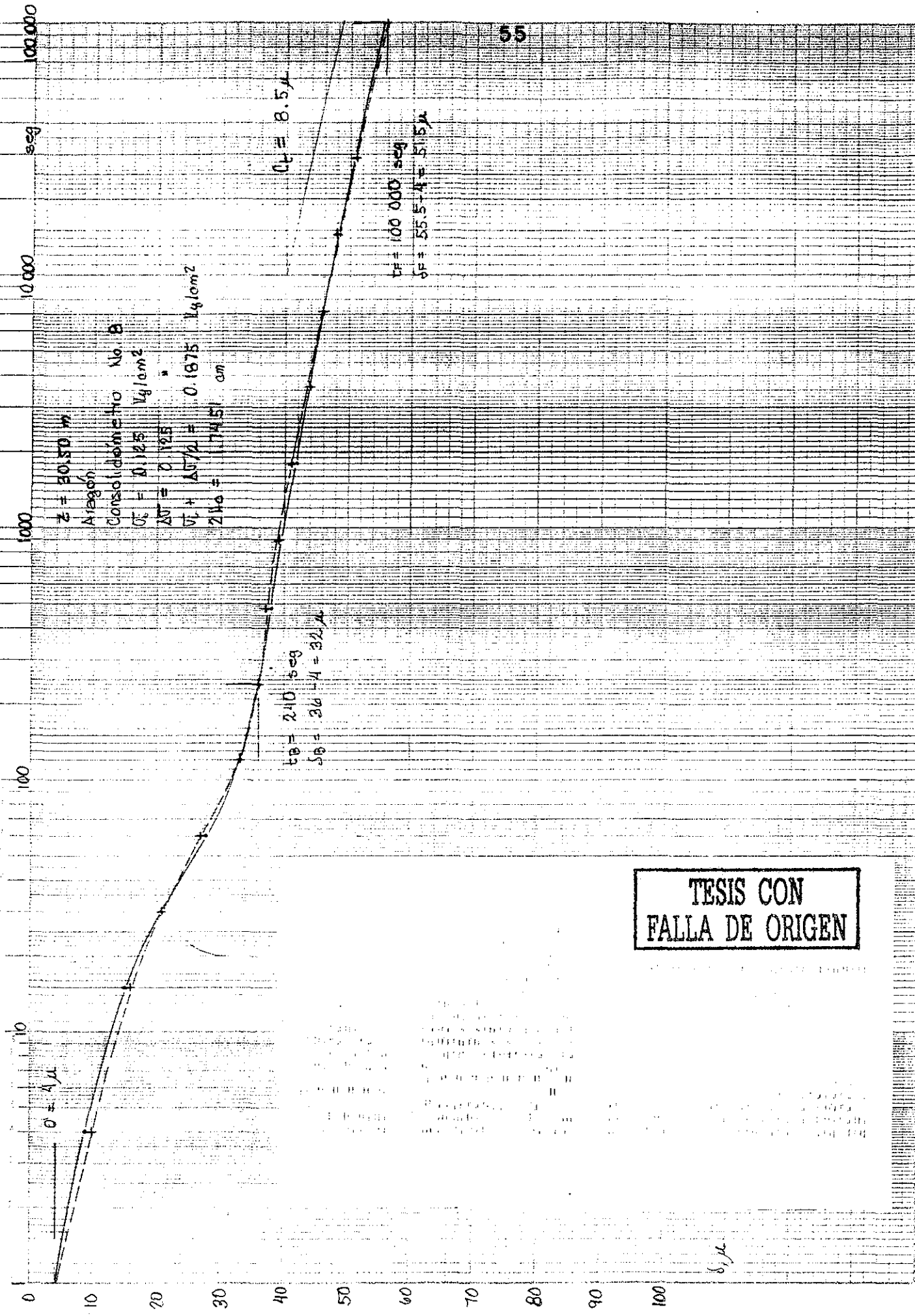


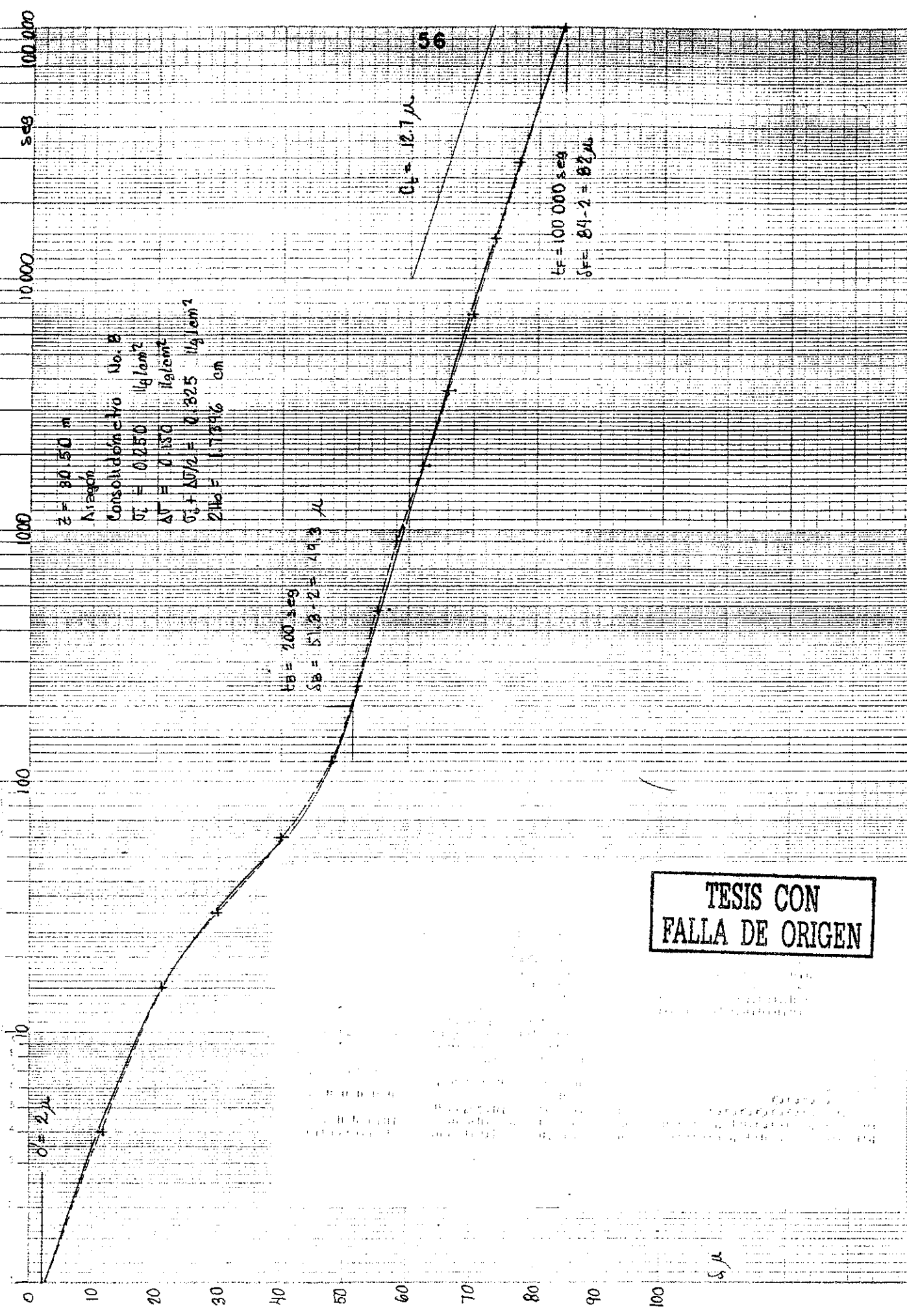
$Z = 260.0$
 Aragón
 Consolidación No. 2
 $V_1 = 1.00$ g/cm³
 $\Delta V = 0.175$ g/cm³
 $V_2 = 1.175$ g/cm³
 $Z_{Ho} = 1.5812$ cm

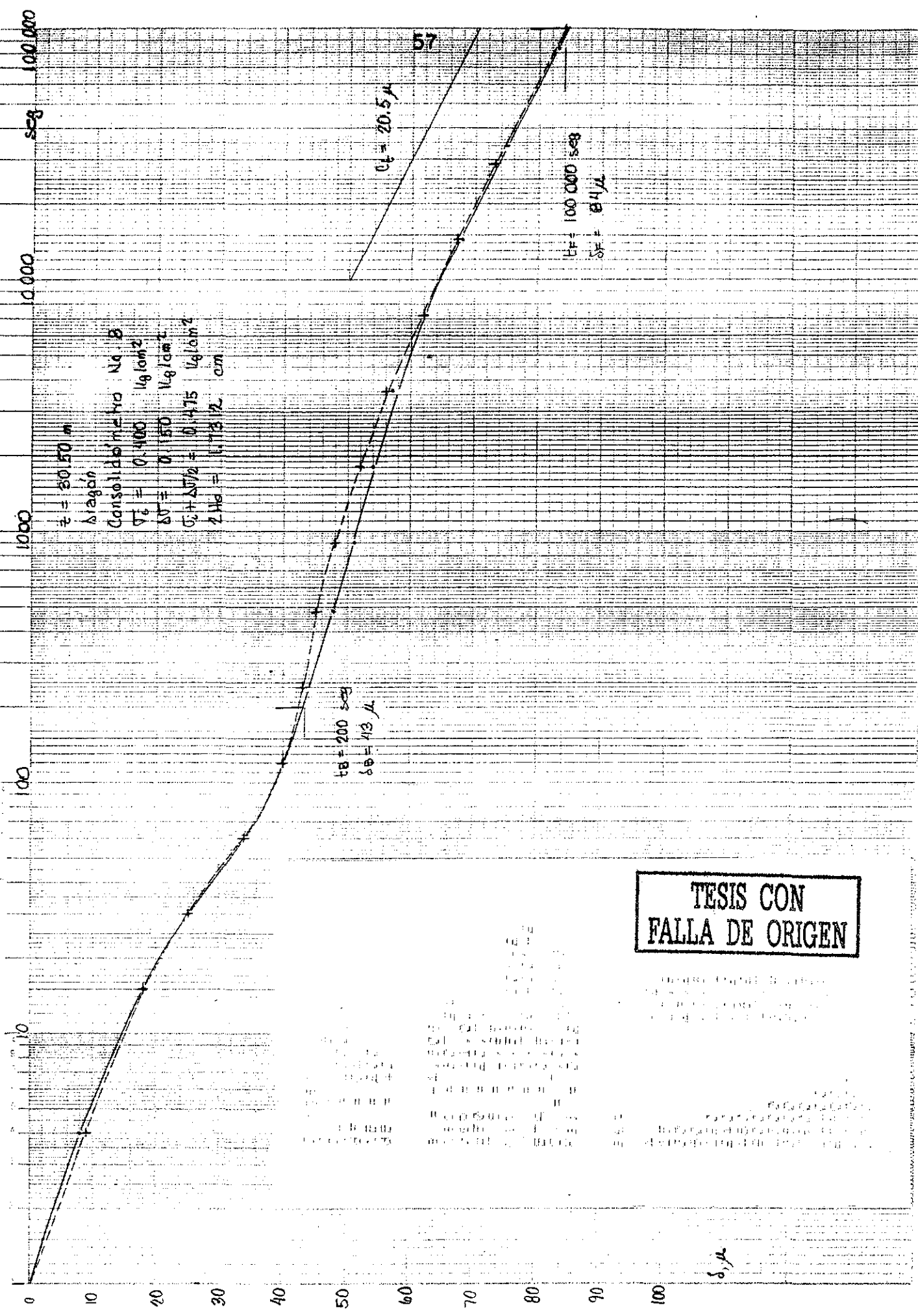
$CF = 100,000.0$ seg
 $SB = 30.2$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

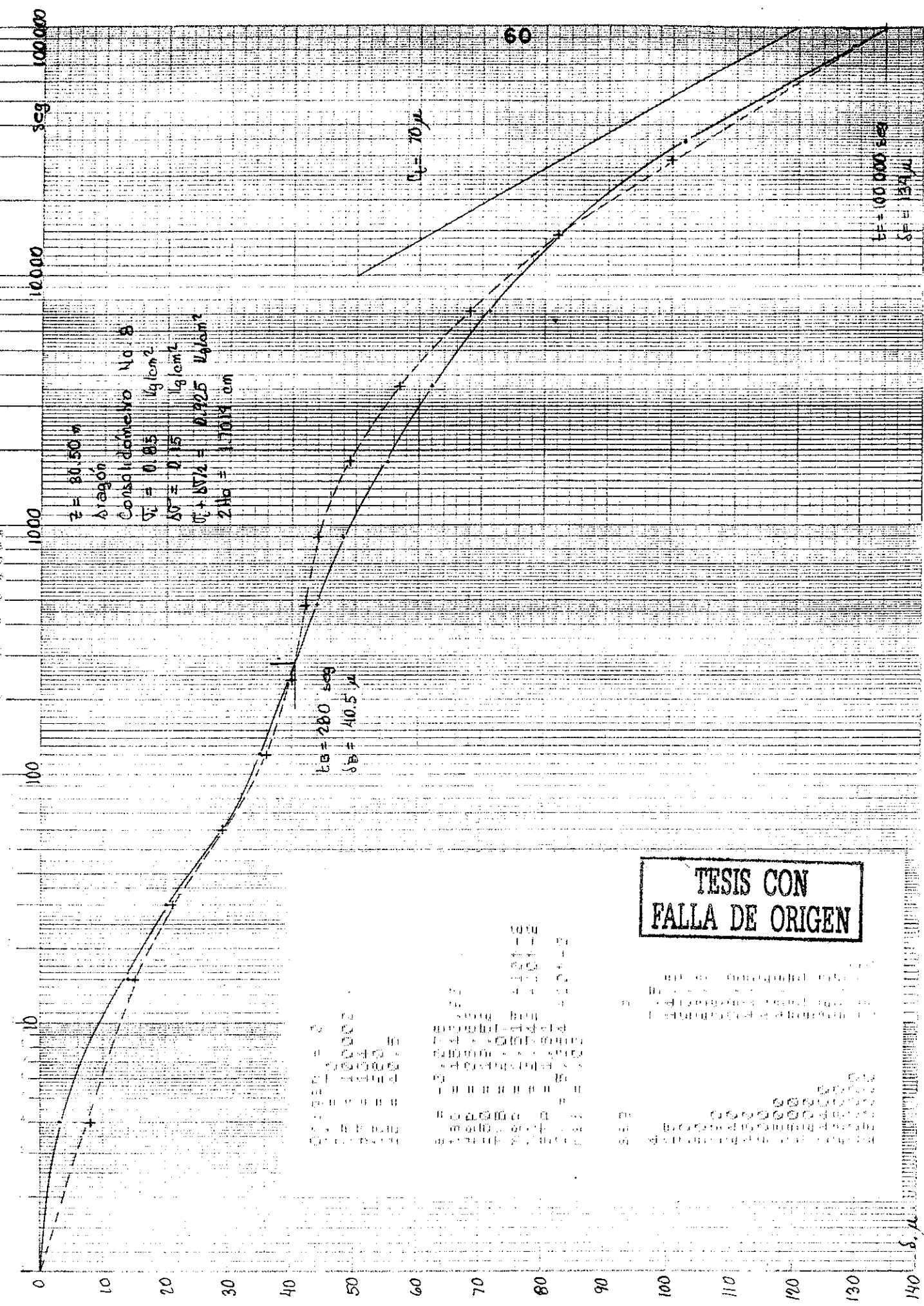
This document contains technical data and calculations related to the consolidation process of soil samples. The data includes parameters such as initial void ratio, change in void ratio, and final void ratio, along with the corresponding consolidation index and horizontal consolidation coefficient.







ESTADÍSTICA DE LOS DATOS



$z = 80.50 \text{ m}$
 Consolidómetro No. 8
 $\sigma_v = 0.85 \text{ kg/cm}^2$
 $\Delta\sigma = 0.15 \text{ kg/cm}^2$
 $\sigma_v + \frac{\Delta\sigma}{2} = 0.525 \text{ kg/cm}^2$
 $2H_a = 1.7014 \text{ cm}$

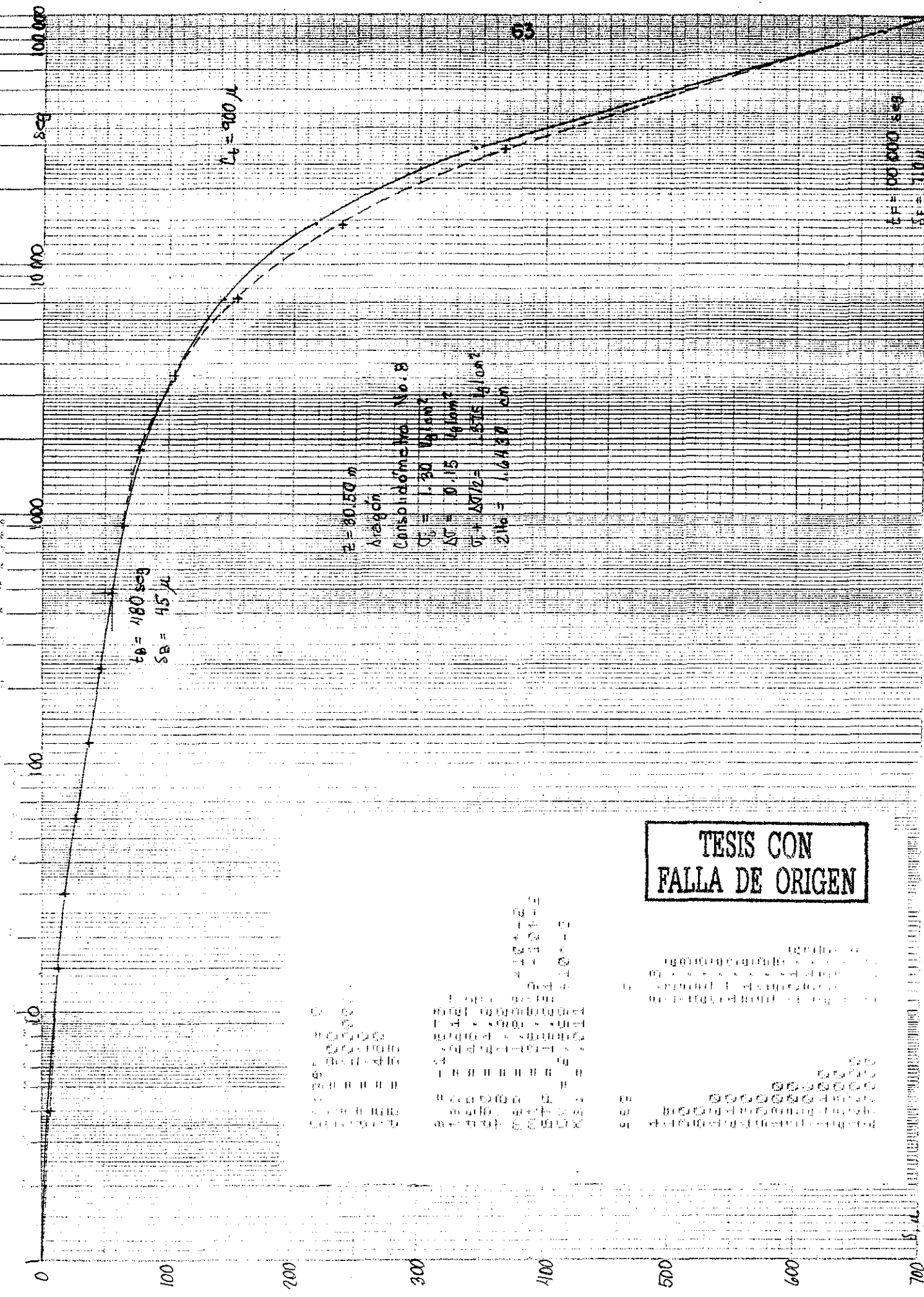
$t_B = 280 \text{ seg}$
 $\delta_B = 40.5 \mu$

$t_0 = 70 \mu$

$t_f = 100,000 \text{ seg}$
 $\delta_f = 139 \mu$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

δ, μ	seg	δ, μ	seg
0	0	100	100000
10	1000	110	150000
20	2000	120	200000
30	3000	130	250000
40	4000	140	300000
50	5000		
60	6000		
70	7000		
80	8000		
90	9000		
100	10000		
110	11000		
120	12000		
130	13000		
140	14000		



$t_0 = 180 \text{ seg}$
 $S_B = 45 \mu$

$t_4 = 900 \mu$

53

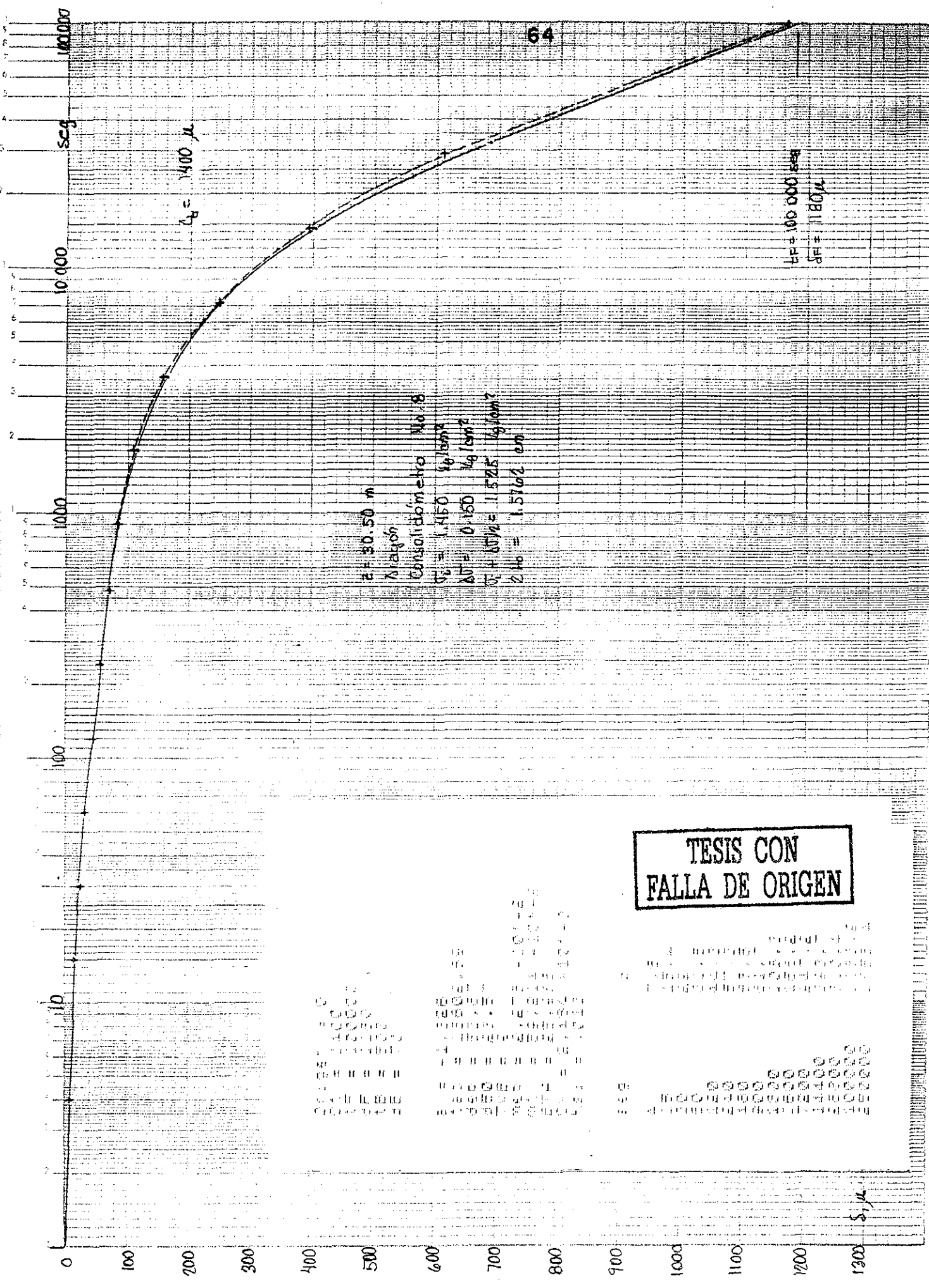
$Z = 30.50 \text{ m}$
 Aragón
 Consorcio No. 8
 $V_0 = 1.30 \text{ g/cm}^3$
 $\Delta \rho = 0.15 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma_1 + \Delta \sigma / 2 = 1.315 \text{ g/cm}^3$
 $2H_0 = 1.6430 \text{ cm}$

$t_H = 100000 \text{ seg}$
 $S_F = 710 \mu$

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

$\sigma_1 + \Delta \sigma / 2 = 1.315 \text{ g/cm}^3$
 $2H_0 = 1.6430 \text{ cm}$
 $V_0 = 1.30 \text{ g/cm}^3$
 $\Delta \rho = 0.15 \text{ g/cm}^3$
 $Z = 30.50 \text{ m}$
 Aragón
 Consorcio No. 8
 $t_0 = 180 \text{ seg}$
 $S_B = 45 \mu$
 $t_4 = 900 \mu$
 $t_H = 100000 \text{ seg}$
 $S_F = 710 \mu$

TEMPERATURA, HUMEDAD Y TIEMPO DE CURADO



64

$\Delta g = 1400 \mu$

MOBIL # 11804
L.P. = 100.000 scg

$z = 30.50 \text{ m}$
 Alagón
 Consolidómetro No. 8
 $\sigma' = 1.450 \text{ kg/cm}^2$
 $\Delta \sigma' = 0.150 \text{ kg/cm}^2$
 $\sigma' + \Delta \sigma' = 1.525 \text{ kg/cm}^2$
 $z' = 1.5702 \text{ cm}$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1000
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 300
 200
 100
 0

S, μ