



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**GUÍA PRÁCTICA PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR
CONSOLIDACIÓN, EN SUELOS SATURADOS**

Diego Velásquez Jofré
Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, noviembre de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA PRÁCTICA PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR
CONSOLIDACIÓN, EN SUELOS SATURADOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

DIEGO VELÁSQUEZ JOFRÉ

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I:	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II:	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III:	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV:	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

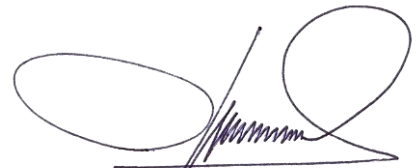
DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA:	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR:	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR:	Ing. Rafael Morales Ochoa
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GUÍA PRÁCTICA PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN, EN SUELOS SATURADOS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 13 de agosto de 2007.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a central vertical stroke, positioned above a horizontal line.

Diego Velásquez Jofré



Guatemala, octubre de 2007.

Ingeniero

Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Ingeniero Quiñónez:

Luego de un breve saludo, sírvame la presente para informarle que el trabajo de graduación "GUÍA PRÁCTICA PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN EN SUELOS SATURADOS", elaborado por el alumno Diego Velásquez Jofré, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular me despido.

Atentamente,

Omar E. Medrano Méndez

Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez

Colegiado 6842

Jefe de la Sección de Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 18 de octubre de 2 007

Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Boiton Velásquez:

Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **GUÍA PRÁCTICA PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN EN SUELOS SATURADOS**, elaborado por el estudiante universitario **Diego Velásquez Jofré** quien contó con la asesoría del Ingeniero Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero que el trabajo desarrollado por el estudiante **Velásquez Jofré**, satisface los requisitos exigidos, por lo cual recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles



Cc archivo



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Diego Velásquez Jofré, titulado GUÍA PRÁCTICA PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN EN SUELOS SATURADOS, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Fernando Amilcar Boiton Velásquez



Guatemala, noviembre 2007.

/bbdeb.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.449.2007

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **GUÍA PRÁCTICA PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN EN SUELOS SATURADOS**, presentado por el estudiante universitario **Diego Velásquez Jofré**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympe Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, noviembre de 2007

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

MI PADRE:

Jorge Mario Velásquez Castro

Por formarme y educarme de la mejor manera, por sus consejos, asesorías y simplemente por ser mi papá.

MI MADRE:

María Concepción Jofré Ortiz de Velásquez

Por la dedicación puesta en mí, por los cuidados, sacrificios, enseñanzas y simplemente por ser mi mamá.

MI HERMANA:

Pilar de María Velásquez Jofré

Por ser un ejemplo a seguir y ayudarme a lo largo de mi formación como profesional.

MI HERMANO:

Martín Velásquez Jofré

Por asistirme y ayudarme durante mi formación profesional, por apoyarme en todo momento.

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Mi alma mater y ámbito en mi formación como profesional.

LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS

Por ser la facilitadora de la adquisición del conocimiento técnico y científico que me permitió obtener el título de Ingeniero Civil.

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS:

Por darme la vida y permitirme obtener el título de Ingeniero Civil.

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Jefe de la Sección de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala CII:

Por facilitar y asesorar el presente trabajo de graduación.

Al personal del laboratorio de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala CII:

Por la ayuda brindada en la realización de los ensayos de laboratorio que contiene el presente trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1	Relaciones volumétricas y gravimétricas en los suelos	1
1.1.1	Fases del suelo. Símbolos y definiciones	1
1.1.2	Relaciones de pesos y volúmenes	4
1.1.3	Relaciones fundamentales	5
1.1.4	Correlación entre la relación de vacíos y la porosidad	7
1.2	Distribución de esfuerzos sobre la masa de suelo	8
1.2.1	Esfuerzos en un punto de una masa de suelo	10
1.2.2	Esfuerzos debidos al propio peso	12
1.3	Concepto de esfuerzo efectivo	14
1.4	Esfuerzos producidos por las cargas aplicadas	17
1.5	Incremento del esfuerzo vertical debido a diferentes tipos de carga	20
1.5.1	Debido a una carga puntual	20
1.5.2	Debido a una carga lineal vertical de longitud infinita	21

1.5.3	Debido a un área circular uniformemente cargada	22
1.5.4	Debido a un área cargada rectangularmente	23
1.6	Teoría de la consolidación	24
1.6.1	Consolidación primaria	27
1.6.2	Pruebas de consolidación unidimensional	29
1.6.3	Consolidación secundaria	34
1.7	Prueba de consolidación en laboratorio	35
1.7.1	Descripción general	35
1.7.2	Equipo para la prueba de consolidación en laboratorio	38
1.7.3	Descripción del mecanismo de transmisión de carga y calibración del aparato	38
1.7.4	Preparación de la muestra	40
1.7.5	Montaje de la prueba de consolidación	41
1.7.6	Procedimiento de la prueba de consolidación	42
1.7.7	Datos de la prueba de consolidación	45
1.7.8	Errores posibles	46
1.7.8.1	En la teoría básica	47
1.7.8.2	En la preparación de la muestra	47
1.7.8.3	En el procedimiento de prueba	48

2. CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN EN SUELOS SATURADOS

2.1	Asentamiento por consolidación	49
2.1.1	Arcillas normalmente consolidadas y preconsolidadas	50
2.1.2	Importancia del estudio de la compresibilidad	52
2.1.3	Expresiones para cálculo de asentamientos por consolidación	52

2.1.3.1	Arcillas normalmente consolidadas	52
2.1.3.2	Arcillas preconsolidadas	53
2.1.3.3	Incremento de presión	54
2.2	Modificación Skempton-Bjerrum para asentamientos por consolidación	55
2.3	Ejemplos de cálculo de asentamientos por consolidación con datos de ensayos de laboratorio	57
2.3.1	Ejemplo 1	58
2.3.2	Ejemplo 2	74
2.4	Comentarios generales del asentamiento por consolidación, un caso histórico	88
3. CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR OTROS MÉTODOS RELACIONADOS		
3.1	Asentamiento elástico basado en la teoría de la elasticidad	93
3.2	Asentamiento elástico de cimentaciones sobre arcillas saturadas	98
3.3	Asentamiento de suelo arenoso: uso del factor de influencia de la deformación unitaria	99
3.4	Rango de los parámetros del material para calcular asentamientos elásticos	101
CONCLUSIONES		103
RECOMENDACIONES		105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		107
BIBLIOGRAFÍA		109
ANEXOS		111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de una muestra de suelo, para indicar la simbología	3
2.	Estado general de esfuerzos en un elemento de suelo y esfuerzos principales	10
3.	Problemas típicos de deformaciones planas	12
4.	Depósito homogéneo de suelo con una superficie horizontal	12
5.	Masa de suelo saturado con una superficie horizontal	14
6.	Relaciones esfuerzo-deformación de materiales ideales, a) elástico, b) plástico rígido, c) elastoplástico, d) elastoplástico con ablandamiento, e) relación esfuerzo-deformación típica de un material real	18
7.	Incremento del esfuerzo vertical debido a carga puntual	20
8.	Incremento del esfuerzo vertical debido a un área circular uniformemente cargada	22
9.	Distribución del área cargada rectangularmente	23
10.	Detalle de la colocación de la muestra en el consolidómetro de anillo flotante	30
11.	Detalle de la colocación de la muestra en el consolidómetro de anillo fijo	31
12.	Forma típica de la curva de consolidación en arcillas (fuera de escala)	32

13. Forma típica de la curva de compresibilidad en suelos compresibles, a) Representación aritmética, b) Representación logarítmica	33
14. Curva de compresibilidad	37
15. Esquema del mecanismo de transmisión de carga de un consolidómetro	39
16. Proceso de formación de arcillas NC y OCR	51
17. Cimentación circular sobre un estrato de arcilla	55
18. Tasas de asentamiento para cimentaciones circulares y continuas	57
19. Características del lugar para el ejemplo 1	58
20. Fotografía de la muestra inalterada de arcilla del ejemplo 1	59
21. Fotografía del anillo de consolidación con la muestra tallada	60
22. Fotografía de la cazuela del consolidómetro	60
23. Curva de consolidación para presión de 1.9 Kg/cm ² , ejemplo 1	63
24. Curva de compresibilidad para el ejemplo 1	68
25. Características del lugar para el ejemplo 2	74
26. Fotografía de la muestra inalterada de arcilla del ejemplo 2	75
27. Curva de consolidación para presión de 1.1 Kg/cm ² , ejemplo 2	77
28. Curva de compresibilidad para el ejemplo 2	82
29. Condiciones del subsuelo para la construcción de un edificio escolar	89
30. Comparación del asentamiento por consolidación medido y predicho con el tiempo	90
31. Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas	94
32. Valores de α , α_{prom} y α_r	95
33. Variación de F_1 con H/B	96
34. Variación de F_2 con H/B	97
35. Valores de A_1 y A_2 para el cálculo de asentamiento elástico	98

36.	Cálculo del asentamiento elástico usando el factor de influencia de la deformación unitaria	99
-----	---	----

TABLAS

I	Lecturas del deformímetro para presión de 1.9 Kg/cm ² , ejemplo 1	62
II	Lecturas corregidas de las curvas de consolidación, ejemplo 1	65
III	Cálculo de la gravedad específica de la arcilla del ejemplo 1	66
IV	Datos finales para elaborar la curva de compresibilidad del ejemplo 1	67
V	Coeficientes de consolidación para el ejemplo 1	70
VI	Cálculo del incremento de presión del ejemplo 1	71
VII	Variación de I_c con respecto de m_1 y n_1	72
VIII	Lecturas del deformímetro para presión de 1.1 Kg/cm ² , del ejemplo 2	76
IX	Lecturas corregidas de las curvas de consolidación, ejemplo 2	79
X	Cálculo de la gravedad específica de la arcilla del ejemplo 2	80
XI	Datos finales para elaborar la curva de compresibilidad del ejemplo 2	81
XII	Coeficientes de consolidación para el ejemplo 2	84
XIII	Cálculo del incremento de presión del ejemplo 2	86
XIV	Parámetros elásticos para varios suelos	101

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\Delta\tau$	Incremento del esfuerzo cortante
$\Delta\sigma$	Incremento del esfuerzo normal
γ_0	Peso específico del agua destilada
γ_m	Peso específico de la masa del suelo
γ_s	Peso específico de la fase sólida del suelo
γ_w	Peso específico del agua en las condiciones reales de trabajo
η	Porosidad
μ	Relación de Poisson
ρ	Densidad aparente del suelo
ρ_s	Densidad saturada del suelo
σ	Esfuerzo normal
σ'	Esfuerzo efectivo
σ'_p	Presión efectiva de preconsolidación
σ'_v	Presión efectiva actual en el estrato de suelo
σ'_{vf}	Presión final actuante en el estrato de suelo
σ_v	Esfuerzo vertical total
τ	Esfuerzo cortante
B	Ancho de la cimentación
c	Cohesión no drenada de suelo de arcilla

C_c	Índice de compresión
C_s	Índice de expansibilidad
C_v	Coeficiente de consolidación
e	Relación de vacíos
E_s	Módulo de elasticidad del suelo
g	Aceleración de la gravedad
G_A	Grado de saturación del aire
G_W	Grado de saturación
H_c	Espesor de la capa de arcilla
I_c	Factor de influencia de esfuerzo
I_z	Factor de influencia de la deformación unitaria
k	Coeficiente de permeabilidad
Kg	Kilogramo
KN	Kilo-Newton
L	Largo de la cimentación
Lect 90%	Lectura al 90% de consolidación
Lect 100%	Lectura al 100% de consolidación
m	Metro
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico
NC	Arcilla normalmente consolidada
OCR	Arcilla preconsolidada
\bar{q}	Esfuerzo a nivel de la cimentación
q_c	Resistencia a la penetración de cono
q_o	Carga transmitida de la cimentación al suelo
S_c	Asentamiento por consolidación
S_e	Asentamiento elástico
S_m	Peso específico relativo de la masa del suelo
S_s	Peso específico relativo de la fase sólida del suelo

$T_{90\%}$	Tiempo al 90% de consolidación
u	Presión intersticial
V_a	Volumen de la fase gaseosa de la muestra
V_m	Volumen total de la muestra de suelo
V_s	Volumen de la fase sólida de la muestra
V_v	Volumen de los vacíos de la muestra de suelo
V_w	Volumen de la fase líquida contenida en la muestra
w	Humedad
W_a	Peso de la fase gaseosa de la muestra
W_m	Peso total de la muestra de suelo
W_s	Peso de la fase sólida de la muestra de suelo
W_w	Peso de la fase líquida de la muestra

GLOSARIO

Asentamiento	Deformaciones verticales producidas por incrementos de carga (en general carga vertical) en un espesor de suelo determinado. Se conocen también como asientos.
Carga axial	Fuerza aplicada a un elemento exactamente en coincidencia con su centroide o eje principal.
Cimentación	Subestructura cuya función principal es transmitir las cargas de la edificación o superestructura al suelo.
Coeficiente de permeabilidad	Característica del suelo, que se refiere al flujo de fluidos a través del mismo. El coeficiente de permeabilidad, generalmente representado por la letra k , es extremadamente variable, según el tipo de suelo.
Compresibilidad	Propiedad que presentan los cuerpos de disminuir su volumen cuando se aumenta la presión ejercida sobre ellos, manteniendo constantes otros parámetros.
Compresión confinada	Prueba de compresión en donde la muestra de suelo no puede deformarse lateralmente.

Concreto reforzado	Combinación del concreto simple (mezcla de cemento, agregado grueso, agregado fino y agua), con acero estructural, generalmente en forma de barras. La finalidad es obtener un material resistente tanto a la compresión como a la tensión.
Consolidación	Proceso de disminución de volumen que tiene lugar en un lapso de tiempo, provocado por un aumento de las cargas sobre el suelo.
Consolidómetro	Aparato para realizar el ensayo de consolidación en el laboratorio. También llamado edómetro.
Curva de compresibilidad	Gráfica en cuyas abscisas se ponen los valores de la presión actuante en escala natural o logarítmica, y en cuyas ordenadas se anotan los correspondientes valores de la relación de vacíos en escala natural.
Curva de consolidación	Gráfica que tiene por abscisas los valores de los tiempos transcurridos en escala logarítmica, y como ordenadas las correspondientes lecturas del extensómetro en escala natural.
Deformímetro	Instrumento para medir desplazamientos lineales. La medida se lee en una carátula que contiene una aguja principal que recorre 100 unidades para dar una vuelta y una aguja pequeña que recorre 10 unidades.

Depósito miocénico	Depósito de suelo formado hace aproximadamente 13 millones de años en el período del Mioceno (uno de los cuatro períodos de la era terciaria), que actualmente se encuentra en lugares de la costa occidental de Norteamérica, en las Antillas y en el norte de África.
Esfuerzo de compresión	Presión que tiende a comprimir el elemento, y por lo tanto causar reducción de volumen, manteniendo siempre una masa constante.
Expansión	Proceso en que la masa de suelo tiende a aumentar su volumen manteniendo su forma. Todo sucede como si estuviese cambiando la escala del espacio tridimensional.
Extensómetro	Aparato que se utiliza para monitorear desplazamientos relativos entre uno o más puntos de monitoreo y el cabezal de medición o punto de referencia, y permite determinar las deformaciones axiales del suelo.
Fluido intersticial	Fluido existente en los vacíos del esqueleto del suelo y que ejerce una presión llamada intersticial.
Flujo plástico	Propiedad mediante la cual el suelo se sigue deformando a través de lapsos considerables, bajo un estado constante de esfuerzo o carga.

Mecánica de Suelos	Es la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que involucran las cargas impuestas a la capa superficial de la corteza terrestre. Esta ciencia fue fundada por Karl von Terzaghi a partir de 1925.
Micrómetro	Instrumento de medición cuyo funcionamiento está basado en el tornillo micrométrico y que sirve para medir las dimensiones de un objeto con alta precisión, del orden de centésimas de milímetros (0.01 mm) y de milésimas de milímetros (0.001mm).
Muestra inalterada	Muestra de suelo que conserva la estructura natural del terreno hasta el momento del ensayo.
Muro de contención	Estructura de contención rígida, destinada a contener algún material, generalmente masas de suelo o tierras.
Nivel freático	Lugar geométrico de los puntos donde la presión del agua es la atmosférica. Por debajo de él las presiones son positivas (agua freática) y por encima negativas (agua capilar, si está en comunicación con el agua freática, o agua de contacto si no lo está).
Peso específico	El peso específico se define como el peso por unidad de volumen. Se calcula al dividir el peso de la sustancia entre el volumen que esta ocupa

Peso específico relativo	El peso específico relativo se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua, a 4°C, destilada y sujeta a una atmósfera de presión.
Presión hidrostática	Es la parte de la presión debida a la masa de un líquido externo en reposo.
Presión intersticial	Presión ejercida por el fluido existente en el esqueleto del suelo.
Sedimentación	Proceso por el cual el suelo, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin.
Suelo isótropo	Suelo que presenta las mismas propiedades físicas en todas las direcciones a partir del punto de análisis.
Suelo homogéneo	Suelo en el que sus propiedades no varían de un punto a otro.
Suelo saturado	Suelo que se caracteriza por tener todos sus vacíos ocupados por agua.
Tensión Superficial	Fuerza atractiva ejercida en la superficie de separación entre materiales en diferentes estados físicos (sólido/líquido, líquido/gas).

Terraplén

Depósito hecho por el hombre que se denomina también relleno. El terraplén constituye realmente un depósito sedimentario en el que el hombre realiza todos los procesos de formación, de una forma controlada para alcanzar resultados previamente definidos.

Turba

Material orgánico compacto, de color pardo oscuro y rico en carbono. Está formado por una masa esponjosa y ligera en la que aún se aprecian los componentes vegetales que la originaron.

RESUMEN

La “Guía práctica para cálculo de asentamientos por consolidación en suelos saturados” consiste en un análisis completo de los conceptos utilizados para comprender dicho asentamiento, así como el desarrollo del cálculo experimental del mismo y la descripción de los métodos de cálculo de asentamientos relacionados al de la consolidación.

En el primer capítulo se desarrollan de manera explícita, los conceptos básicos necesarios; las relaciones volumétricas y gravimétricas de los suelos, la distribución de esfuerzos en una masa de suelo, el concepto de esfuerzo efectivo, los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas al suelo, el incremento del esfuerzo vertical debido a diferentes tipos de carga, la teoría de la consolidación, y una minuciosa descripción de la prueba de consolidación en el laboratorio.

En el segundo capítulo se describe de manera detallada el asentamiento por consolidación en suelos saturados, iniciando con la diferenciación de arcillas normalmente consolidadas y preconsolidadas, recalcando la importancia del estudio de la compresibilidad. Se describen también, las expresiones utilizadas para calcular el asentamiento por consolidación, la modificación Skempton-Bjerrum para asentamientos por consolidación y los comentarios generales del asentamiento por consolidación, así como un caso histórico.

El segundo capítulo constituye la parte más importante, ya que en él se desarrolla el algoritmo de cálculo experimental del asentamiento por consolidación en suelos saturados, partiendo de los datos obtenidos del ensayo de laboratorio.

Por último, en el tercer capítulo, se describen las expresiones de cálculo de asentamientos por otros métodos relacionados al de la consolidación. Se describe el asentamiento elástico basado en la teoría de la elasticidad, el asentamiento elástico de cimentaciones sobre arcillas saturadas, el uso del factor de influencia de la deformación unitaria en asentamientos en suelos arenosos y por último el rango de los parámetros del material para calcular asentamientos elásticos.

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar de manera precisa, concisa y exacta, una guía práctica para conocer y calcular los asentamientos por consolidación en suelos saturados, la que complementará los análisis del suelo que se realizan previos al diseño de obras de infraestructura física.

ESPECÍFICOS

1. Conocer de manera exacta todos los conceptos necesarios para comprender íntegramente el cálculo de asentamientos por consolidación.
2. Analizar los diferentes tipos de suelos saturados, en especial las arcillas, y analizar la importancia de éstas en los asentamientos por consolidación.
3. Simplificar los métodos existentes de cálculo de asentamientos por consolidación en suelos saturados, a un algoritmo sencillo y confiable.
4. Coadyuvar con el estudio de los asentamientos por consolidación, a un completo análisis del suelo para el posterior diseño de cimentaciones para cualquier tipo de proyecto de infraestructura física.

5. Aprender el impacto que tiene en el suelo la construcción de una cimentación y por ende, cómo se producen los asentamientos por consolidación.
6. Establecer la importancia que tienen los asentamientos por consolidación en los suelos saturados, y de la forma de cómo se pueden afrontar al momento de construir una cimentación.
7. Relacionar el cálculo de asentamientos por consolidación con el cálculo de asentamientos por otros métodos conocidos.

INTRODUCCIÓN

En una obra de infraestructura física, la cimentación transmite las cargas de la superestructura al suelo, y antes de su diseño y ejecución, es necesario que el ingeniero civil proyectista conozca de manera precisa y exacta las propiedades del lugar donde se llevará a cabo dicha obra de infraestructura, realizando primero un análisis exhaustivo del suelo, con la finalidad de entender todas sus características físicas y sus propiedades mecánicas y químicas.

Cuando se construye la cimentación, ocurren en el suelo asentamientos debidos al peso de la misma. Se producen los asentamientos instantáneos y los asentamientos por consolidación.

El asentamiento por consolidación tiene la característica que se da a lo largo del tiempo, y ocurre en suelos arcillosos saturados. El análisis de dicho asentamiento es imprescindible, y para fines generales del diseño de la obra, y en específico de la cimentación, puede ser calculado a partir de datos obtenidos del ensayo de consolidación en laboratorio.

Se procede entonces a calcular experimentalmente el asentamiento por consolidación, obteniendo muestras de suelos arcillosos saturados con la finalidad de realizar el ensayo en laboratorio y luego analizar diferentes casos de cimentaciones en diferentes perfiles estratigráficos.

Se persigue con el análisis realizado, la elaboración de un algoritmo sencillo y confiable, para calcular asentamientos por consolidación en suelos saturados. Dicho análisis está precedido por el desarrollo de todos los conceptos básicos necesarios para la comprensión del mismo, y precedido por las expresiones para calcular asentamientos por otros métodos relacionados al de la consolidación.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

Para entender de manera exacta y precisa el cálculo de asentamientos por consolidación en suelos saturados, es necesario conocer primero algunos conceptos básicos que permitirán una mejor comprensión. En el primer capítulo se desarrollan los conceptos de las relaciones volumétricas y gravimétricas en los suelos, los esfuerzos sobre la masa de suelo, el concepto de esfuerzo efectivo, el incremento del esfuerzo vertical debido a diferentes tipos de carga y todo lo relacionado al tema de la consolidación.

1.1 Relaciones volumétricas y gravimétricas en los suelos

1.1.1 Fases del suelo. Símbolos y definiciones

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo (incluyendo la capa sólida adsorbida); la líquida por el agua (libre, específicamente), aunque en los suelos pueden existir otros líquidos de menor significación; la fase gaseosa comprende sobre todo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.). La capa viscosa del agua adsorbida que presenta propiedades intermedias entre la fase sólida y la líquida, suele incluirse en esta última, pues es susceptible de desaparecer cuando el suelo es sometido a una fuerte evaporación (secado).

Las fases líquida y gaseosa del suelo suelen comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de los sólidos.

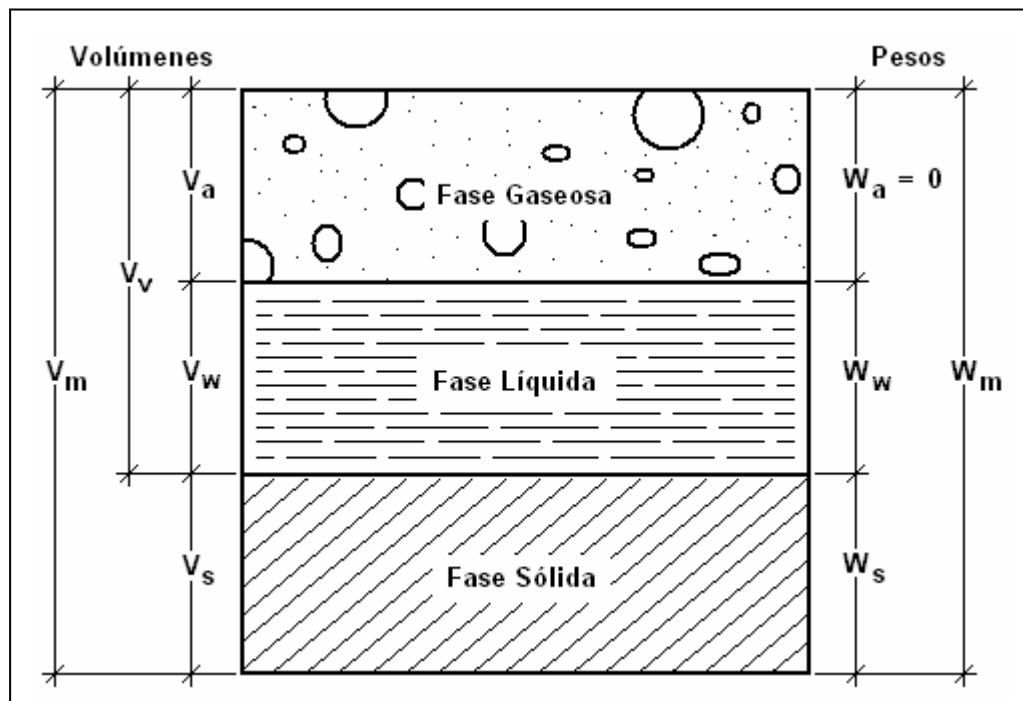
Se dice que un suelo es totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Un suelo en tal circunstancia consta, como caso particular, de sólo dos fases, la sólida y la líquida. Muchos suelos yacientes bajo el nivel freático son totalmente saturados.

Algunos suelos contienen, además, materia orgánica en diversas formas y cantidades; en las turbas, estas materias predominan y consisten en residuos vegetales parcialmente descompuestos. Aunque el contenido de materia orgánica y las capas adsorbidas son muy importantes desde el punto de vista de las propiedades mecánicas del suelo, no es preciso considerarlos en la medición de pesos y volúmenes relativos de las tres fases principales; su influencia se toma en cuenta más fácilmente en etapas posteriores del estudio de ciertas propiedades de los suelos.

En los laboratorios de Mecánica de Suelos puede determinarse fácilmente el peso de las muestras húmedas, el peso de las muestras secadas al horno y el peso específico relativo de los suelos. Estas magnitudes no son, empero, las únicas cuyo cálculo es necesario; es preciso obtener relaciones sencillas y prácticas, a fin de poder medir algunas otras magnitudes en términos de éstas. Estas relaciones, de tipo volumétrico y gravimétrico, son de la mayor importancia para la aplicación sencilla y rápida de la teoría y su dominio debe considerarse indispensable.

La Figura 1 representa el esquema de una muestra de suelo, en el que aparecen las fases principales, así como los conceptos de uso más común, con los símbolos con que se indican regularmente.

Figura 1. Esquema de una muestra de suelo, para indicar la simbología



Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. **Mecánica de Suelos**. Pág. 52

El significado de los símbolos es el siguiente:

V_m = Volumen total de la muestra de suelo (volumen de la masa).

V_s = Volumen de la fase sólida de la muestra (volumen de sólidos).

V_v = Volumen de los vacíos de la muestra de suelo (volumen de vacíos).

V_w = Volumen de la fase líquida contenida en la muestra (volumen de agua).

V_a = Volumen de la fase gaseosa de la muestra (volumen de aire).

W_m = Peso total de la muestra de suelo (peso de la masa).

W_s = Peso de la fase sólida de la muestra de suelo (peso de los sólidos).

W_w = Peso de la fase líquida de la muestra (peso del agua).

W_a = Peso de la fase gaseosa de la muestra, convencionalmente considerado como nulo.

1.1.2 Relaciones de pesos y volúmenes

En Mecánica de Suelos se relaciona el peso de las distintas fases con sus volúmenes correspondientes, por medio del concepto de peso específico, es decir, de la relación entre el peso de la sustancia y su volumen. Se distinguen los siguientes pesos específicos:

γ_0 = Peso específico del agua destilada, a 4°C de temperatura y a la presión atmosférica correspondiente al nivel del mar.

γ_w = Peso específico del agua en las condiciones reales de trabajo; su valor difiere por del de γ_0 y, en muchas cuestiones prácticas, ambos son tomados como iguales.

γ_m = Peso específico de la masa del suelo. Por definición se tiene

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_m}$$

γ_s = Peso específico de la fase sólida del suelo

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

El peso específico relativo se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua, a 4°C, destilada y sujeta a una atmósfera de presión. Se distinguen los siguientes pesos específicos relativos:

S_m = Peso específico relativo de la masa del suelo. Por definición:

$$S_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_0} = \frac{W_m}{V_m \gamma_0}$$

S_s = Peso específico relativo de la fase sólida del suelo (de sólidos), para el cual se tiene:

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} = \frac{W_s}{V_s \gamma_0}$$

1.1.3 Relaciones fundamentales

Las relaciones que se dan a continuación son de gran importancia, para el manejo comprensible de las propiedades mecánicas de los suelos y un completo dominio de su significado y sentido físico.

a) Se denomina **Relación de Vacíos**, Oquedad o Índice de poros a la relación entre el volumen de los vacíos y el de los sólidos de un suelo:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

La relación puede variar teóricamente de cero ($V_v = 0$) a ∞ (valor correspondiente a un espacio vacío). En la práctica no suelen hallarse valores menores de 0.25 (arenas muy compactas) ni mayores de 15, en el caso de algunas arcillas altamente compresibles.

b) Se llama **Porosidad** de un suelo a la relación entre su volumen de vacíos y el volumen de su masa. Se expresa como porcentaje:

$$\eta(\%) = \frac{V_v}{V_m} \times 100$$

Esta relación puede variar de 0 (en un suelo ideal con sólo fase sólida) a 100 (espacio vacío). Los valores reales suelen oscilar entre 20% y 95%.

c) Se denomina **Grado de Saturación** de un suelo a la relación entre su volumen de agua y el volumen de sus vacíos. Suele expresarse también como un porcentaje.

$$G_w(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Varía de cero (suelo seco) a 100% (suelo totalmente saturado).

d) Se conoce como **Humedad** o Contenido de agua de un suelo, a la relación entre el peso de agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida. Suele expresarse en porcentaje:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Varía teóricamente de cero a ∞ . En la naturaleza la humedad de los suelos varía entre límites muy amplios.

e) El **Grado de saturación de aire** es una magnitud de escasa importancia práctica, respecto a las anteriores relaciones. Se define como:

$$G_A(\%) = \frac{V_A}{V_v} \times 100$$

1.1.4 Correlación entre la relación de vacíos y la porosidad

Considerando una muestra de suelo en representación esquemática, y adoptando arbitrariamente el valor unidad para el volumen de sólidos; se puede hacer una correlación entre la relación de vacíos y la porosidad, con base en ese dato de partida ($V_s = 1$) y aplicando las definiciones correspondientes. Aplicando la definición de porosidad tenemos que:

$$\eta = \frac{V_v}{V_m} = \frac{e}{1+e}$$

Y por lo tanto, se deduce de inmediato:

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

Para suelos compresibles (arcillas) es de interés conocer la disminución del volumen de vacíos bajo la influencia de las cargas; en tal caso, la porosidad tiene la desventaja de representar una relación entre dos variables, mientras la relación de vacíos expresa la relación de una cantidad variable a una constante (V_s), aun para un suelo en compresión

1.2 Distribución de esfuerzos sobre la masa de suelo

Cuando una estructura se apoya en la superficie terrestre, transmite los esfuerzos al suelo en donde ésta se cimienta. Estos esfuerzos producen deformaciones en el suelo que pueden ocurrir de tres maneras:

- a) Por deformación elástica de las partículas.
- b) Por cambio de volumen en el suelo como consecuencia de la evacuación del líquido existente en los huecos entre las partículas.
- c) Por deslizamiento de las partículas, que pueden conducir al deslizamiento de una gran masa de suelo.

El primer caso es despreciable para la mayoría de los suelos, en los niveles de esfuerzo que ocurren en la práctica. El segundo caso corresponde al fenómeno de la consolidación. El tercer caso, corresponde a fallas del tipo catastróficos y para evitarla se debe hacer un análisis de estabilidad, que requiere del conocimiento de la resistencia al corte de suelo. El análisis debe asegurar, que los esfuerzos de corte solicitantes son menores que la resistencia al corte.

Para explicar el comportamiento ingenieril de los suelos es necesario entender el concepto de esfuerzo en una masa de suelo y, en particular, la manera como el esfuerzo que actúa sobre el suelo como un todo se relaciona con los esfuerzos que se desarrollan dentro del esqueleto del suelo y del fluido intersticial.

Para resolver problemas de ingeniería, también es necesario entender cómo evaluar los esfuerzos que actúan en un punto de la masa de suelo debidos a su propio peso y así mismo el cambio de esfuerzos que se induce en el suelo debido a la acción de carga (o descarga) externa producto de la construcción de obras de ingeniería. De la misma manera son importantes las deformaciones de la masa de suelo, principalmente los asentamientos, que resultan de los cambios de tales esfuerzos.

Por lo general, el esfuerzo sobre un punto no es el mismo en todas las direcciones y, por tanto, es importante estudiar el estado general de los esfuerzos que existen en un punto dentro de la masa de suelo y considerar las relaciones entre los esfuerzos actuantes en direcciones diferentes. Sin embargo, en muchos problemas de ingeniería el interés principal se centra sobre los esfuerzos que actúan en una dirección particular; por ejemplo, el estudio de la capacidad portante y los asentamientos de cimentaciones dependen principalmente de los esfuerzos que actúan en la dirección vertical, en tanto que el estudio de las presiones de tierras sobre los muros de contención requiere de un conocimiento de los esfuerzos horizontales en la masa de suelo.

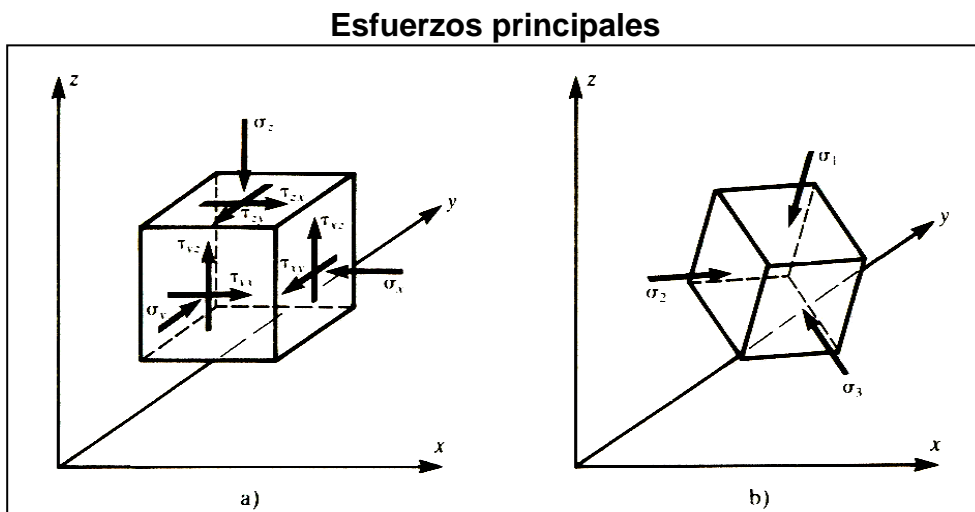
Realmente, es bastante difícil medir con precisión los esfuerzos existentes en el interior de un suelo, principalmente debido a que la presencia de un medidor altera el campo de esfuerzos que existiría si aquel no se hubiera colocado. El concepto de esfuerzo está estrechamente asociado con el de medio continuo. Así pues, cuando hablamos de los esfuerzos que actúan en un punto, imaginamos las fuerzas que actúan sobre las caras de un cubo infinitamente pequeño compuesto de un cierto material homogéneo.

A primera vista se puede preguntar si tiene sentido aplicar el concepto de esfuerzo a un sistema formado por partículas como es el suelo. Sin embargo, el concepto de esfuerzo que se aplica a los suelos no es más abstracto que el mismo concepto aplicado a los metales. En cierto sentido, toda la materia se compone de partículas y sólo tiene sentido el hablar de esfuerzo microscópico si este esfuerzo varía poco en una distancia del orden de magnitud del tamaño de la partícula más gruesa. Cuando se habla de los esfuerzos en un “punto” del suelo, debemos imaginar un “punto” bastante grueso.

1.2.1 Esfuerzos en un punto de una masa de suelo

Para obtener una mejor perspectiva del estado general de esfuerzos totales en un elemento dentro de una masa de suelo, observemos la Figura 2.

Figura 2. a) Estado general de esfuerzos en un elemento de suelo, b)



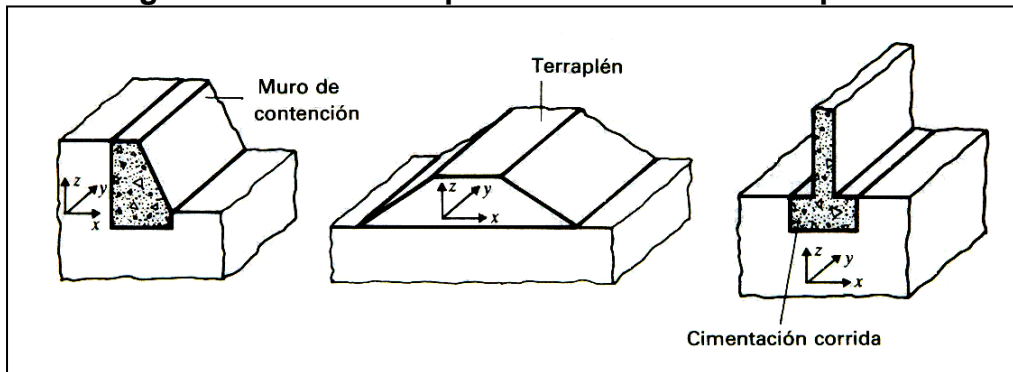
Fuente: Peter Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Pág. 50

El estado de esfuerzos que resulta en cada cara se caracteriza por una componente de esfuerzo normal σ y dos componentes de esfuerzo cortante τ , cada una de las cuales se identifica con un sufijo direccional relacionado con las tres direcciones de referencia x, y, z . Sin embargo, para este estado de esfuerzos debe existir en el elemento un conjunto de tres planos mutuamente perpendiculares sobre los cuales el esfuerzo resultante es normal, con las componentes de esfuerzos cortantes nulos. Éstos son los planos principales y los esfuerzos normales asociados son los esfuerzos principales.

En orden de magnitud descendente tenemos el esfuerzo principal mayor σ_1 que actúa sobre el plano principal mayor, el esfuerzo principal intermedio σ_2 que actúa sobre el plano principal intermedio, y el esfuerzo principal menor σ_3 que actúa sobre el plano principal menor. En la Figura 2b se representa el estado de esfuerzos del elemento cuando las caras del elemento están orientadas en las direcciones de los planos principales. Si el elemento se toma de tamaño infinitesimal, los esfuerzos que se muestran en la Figura 2 en las caras del elemento pueden tomarse para describir los esfuerzos que actúan sobre planos diferentes en un punto de la masa de suelo.

En los casos de muros de contención, terraplenes, cortes y cimentaciones corridas, la masa de suelo sometida a esfuerzo es a menudo muy grande en una dirección, como se ilustra en la Figura 3. Para esta geometría típica, las deformaciones de la masa de suelo en la dirección y solo se producen localmente en los bordes de la estructura, y las condiciones de la mayor parte de la masa de suelo en la dirección y reducimos el problema a un análisis bidimensional de esfuerzos, en el cual únicamente es necesario considerar los esfuerzos en el plano x, z .

Figura 3. Problemas típicos de deformaciones planas

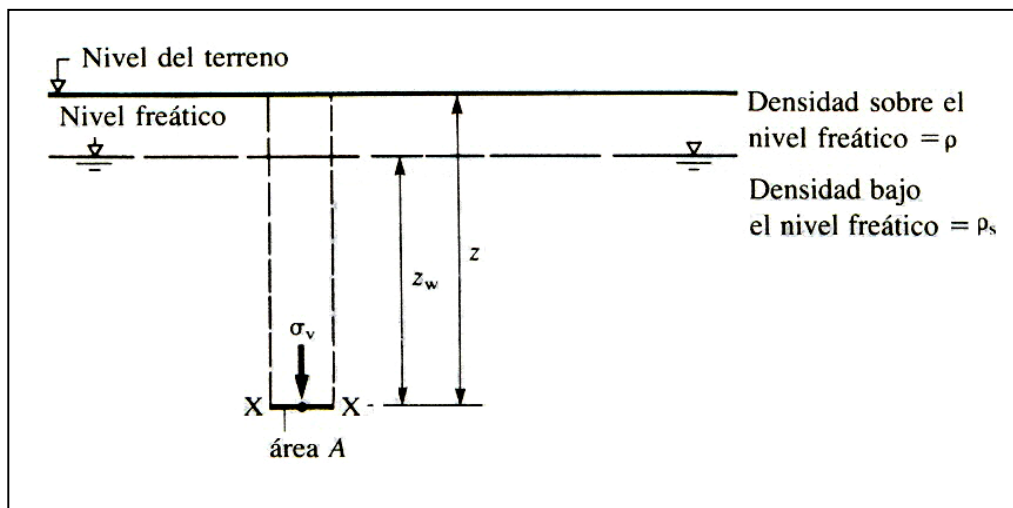


Fuente: Peter Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Pág. 51

1.2.2 Esfuerzos debidos al propio peso

El esfuerzo vertical que existe en una masa de suelo debido solamente a su propio peso se denomina esfuerzo de sobrecarga. Con la Figura 4 que se muestra a continuación se analiza dicho esfuerzo.

Figura 4. Depósito homogéneo de suelo con una superficie horizontal



Fuente: Peter Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Pág. 55

Para estas condiciones el esfuerzo cortante en todos los planos verticales es cero, y por lo tanto, los esfuerzos vertical y horizontal son esfuerzos principales. El esfuerzo vertical total σ_v (o presión de sobrecarga total) en cualquier punto es simplemente el esfuerzo que resulta del peso de todo el material por encima del punto. Así considerando el plano horizontal XX de área A , a una profundidad z , el peso total de la columna vertical de suelo por encima de XX está dado por $W = \rho g(z - z_w)A + \rho_s g z_w A$, donde ρ es la densidad aparente del suelo, ρ_s es la densidad saturada, y g es la aceleración de la gravedad. Entonces, el esfuerzo vertical total σ_v sobre XX definido como W/A , esta dado por $\sigma_v = \rho g(z - z_w) + \rho_s g z_w$.

La presión intersticial u , en cualquier punto de la masa de suelo tendrá un valor de equilibrio compatible con las condiciones de frontera hidráulicas existentes en la masa de suelo. Las condiciones más simples son aquellas en las que el nivel de aguas subterráneas es estático, en cuyo caso las presiones intersticiales se denominan presiones hidrostáticas. Al ser una presión de fluido, la presión intersticial en cualquier punto es la misma en todas las direcciones, y por tanto no hay necesidad de atribuirle un sufijo direccional.

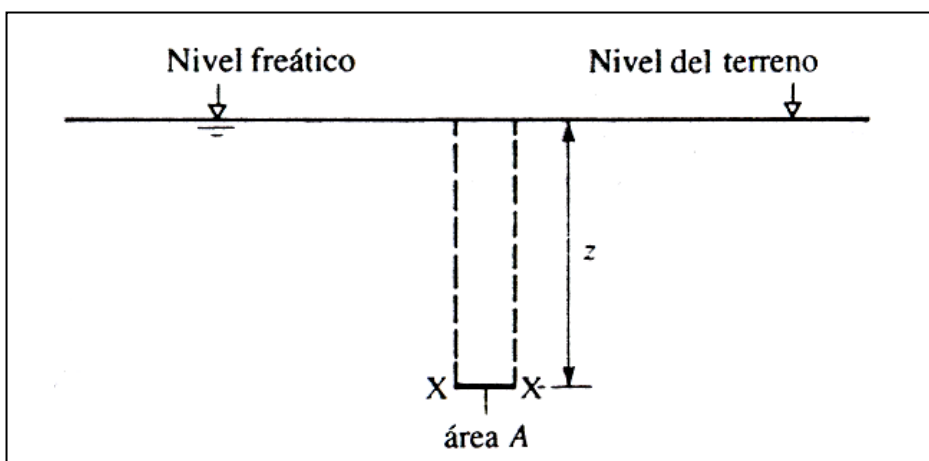
Bajo condiciones hidrostáticas, la presión efectiva de sobrecarga en una masa de suelo es función de la densidad total del suelo que se encuentre por encima del punto considerado sobre el nivel freático y de la densidad efectiva del suelo que se encuentre por encima del punto considerado bajo el nivel freático. El esfuerzo horizontal en un punto de la masa de suelo está fuertemente determinado por la historia de esfuerzos del depósito, y como tal no puede calcularse de una manera simple como los esfuerzos de sobrecarga.

1.3 Concepto de esfuerzo efectivo

En una masa de suelo existen esfuerzos dentro del esqueleto del suelo que resultan de las fuerzas que actúan sobre los puntos de contacto entre partículas individuales, y existen esfuerzos dentro del fluido intersticial que ocupan los vacíos del suelo. Para analizar el comportamiento ingenieril de los suelos es necesario tener la capacidad de distinguir estas dos clases de esfuerzos y también entender la relación entre ellos.

Si se considera dentro de este propósito, una masa de suelo saturado con una superficie horizontal como se muestra en la Figura 5, con el nivel freático a nivel del terreno, se tiene que en un plano horizontal XX de área A , a una profundidad z , la columna vertical de suelo por encima de XX tendrá el peso total W siguiente: $W = W_S + W_W$, donde W_S es el peso de las partículas de suelo y W_W es el peso del agua en los vacíos.

Figura 5. Masa de suelo saturado con una superficie horizontal



Fuente: Peter Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Pág. 49

Las partículas del suelo por debajo del nivel freático están sometidas a un empuje U de tal manera que su peso efectivo W'_S está dado por:

$$W'_S = W_S - U$$

Despejando la ecuación anterior obtenemos que el peso de las partículas de suelo es $W_S = W'_S + U$, y reemplazando en la ecuación $W = W_S + W_W$ obtenemos el peso total: $W = W'_S + U + W_W$. Si V_S representa el volumen de las partículas de suelo en la columna, y V_W el volumen de agua, sustituyendo $U = \rho_w g V_S$ (principio de Arquímedes) y $W_W = \rho_w g V_W$, finalmente el peso total es: $W = W'_S + \rho_w g (V_S + V_W)$.

Como el suelo está saturado, el volumen de agua V_W es igual al volumen de vacíos V_V . Por tanto $V_S + V_W$ representa el volumen total V de la columna y sustituyendo en la ecuación del peso total, obtenemos la expresión: $W = W'_S + \rho_w g V$, y como $V = Az$, y sustituyendo dicho valor en la última expresión encontrada finalmente obtenemos:

$$\frac{W}{A} = \frac{W'_S}{A} + \rho_w g z$$

La expresión W/A define el esfuerzo sobre XX como resultado del peso total de la columna y se denomina esfuerzo total, representado por σ . La expresión W'_S/A es el esfuerzo sobre XX como resultado del peso efectivo de las partículas de suelo y se denomina esfuerzo efectivo, representado por σ' (o algunas veces $\bar{\sigma}$).

Puesto que el plano XX está a la profundidad z por debajo del nivel freático, el término $\rho_w gz$ constituye la presión intersticial hidrostática en XX , representada por u . Así obtenemos la relación:

$$\sigma = \sigma' + u$$

La ecuación anterior generalmente se cumple para suelos saturados, sin tener en cuenta las condiciones del agua en los poros ni la influencia de las cargas externas. Esta relación se conoce como principio de esfuerzo efectivo y simplemente propone que en cualquier punto de una masa de suelo saturado el esfuerzo total en cualquier dirección es igual a la suma algebraica del esfuerzo efectivo en esa dirección y la presión intersticial.

A pesar de su forma algebraica extremadamente simple, el principio de esfuerzo efectivo es quizá la relación de más importancia en el estudio de la Mecánica de Suelos ⁽¹⁾.

La definición de esfuerzo efectivo y el hecho de que éste está relacionado con el comportamiento del suelo se combinan para establecer el principio de esfuerzos efectivos que pueden plantearse de la forma siguiente:

1. El esfuerzo efectivo es igual al esfuerzo total menos la presión intersticial.
2. El esfuerzo efectivo controla ciertos aspectos del comportamiento del suelo, principalmente la consolidación y la resistencia.

Se puede razonar intuitivamente que el esfuerzo efectivo estará relacionado más directamente con el comportamiento del suelo que el esfuerzo total o la presión intersticial. Por ejemplo, un aumento del esfuerzo efectivo producirá un reajuste de las partículas de suelo pasando a una agrupación más compacta; sin embargo, un aumento análogo del esfuerzo total o de la presión intersticial, manteniendo constante el esfuerzo efectivo producirá lógicamente un efecto escaso o nulo sobre la compactación de las partículas. El esfuerzo efectivo es el factor clave en la solución de la mayoría de los problemas de ingeniería en suelos y rocas, húmedos o saturados.

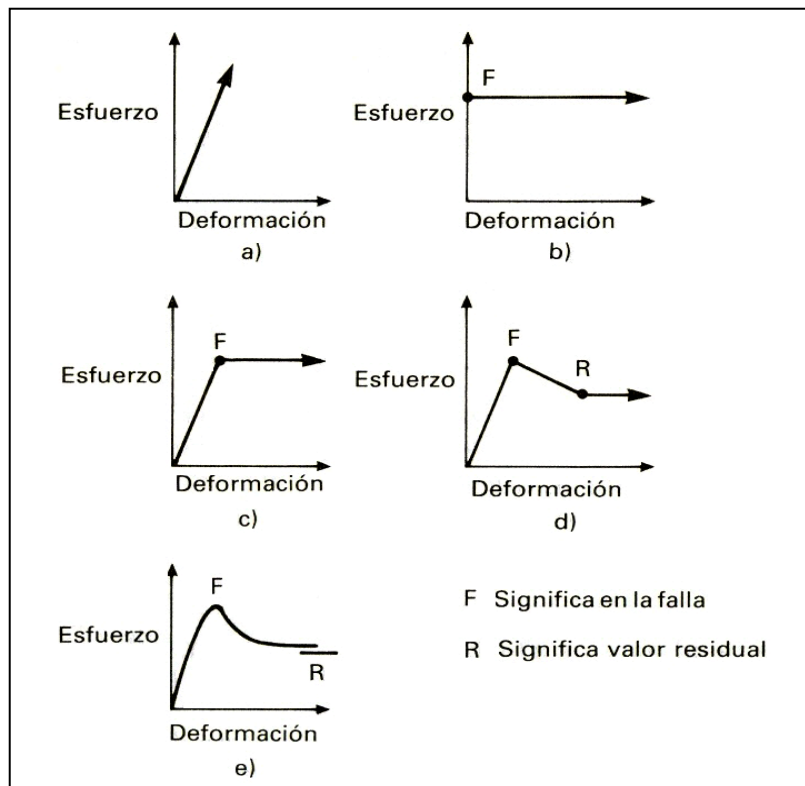
1.4 Esfuerzos producidos por las cargas aplicadas

Los resultados de la teoría de la elasticidad se emplean frecuentemente para calcular los esfuerzos producidos en una masa de suelo por las cargas aplicadas exteriormente. Esta teoría parte de la hipótesis de que el esfuerzo es proporcional a la deformación. La mayoría de las soluciones más útiles de esta teoría suponen también que el suelo es homogéneo (sus propiedades no varían de un punto a otro) e isótropo (sus propiedades son las mismas cualquiera que sea la dirección que se considere a partir del punto).

El suelo rara vez se ajusta exactamente a estas hipótesis, y muy a menudo no las cumple en absoluto. Sin embargo el ingeniero no tiene otra alternativa que emplear los resultados de esta teoría junto con su criterio personal. La obtención de la solución elástica para unas determinadas cargas y condiciones de contorno o frontera es bastante tediosa.

Las distribuciones de esfuerzos que producen en una masa de suelo la aplicación de las cargas resultantes de la construcción de obras de ingeniería dependen del espesor y la uniformidad de la masa de suelo, del tamaño y la forma de área cargada, y de las propiedades esfuerzo-deformación del suelo. Ahora, el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales reales rara vez es simple, y en el caso de los suelos ingenieriles frecuentemente es muy complejo. Para ilustrarlo, nos referimos a la Figura 6 y comparamos las relaciones esfuerzo-deformación para un número de materiales ideales con la de un suelo real.

Figura 6. Relaciones esfuerzo-deformación de materiales ideales, a) elástico, b) plástico rígido, c) elastoplástico, d) elastoplástico con ablandamiento, e) relación esfuerzo-deformación típica de un material real



Fuente: Peter Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Pág. 58

Sin embargo, dentro del contexto de la búsqueda de los esfuerzos y deformaciones en una masa de suelo, pueden identificarse dos categorías de problemas de ingeniería. Los problemas de estabilidad, que constituyen una de las categorías, se analizan considerando el equilibrio límite de una masa de suelo que esta en estado de falla por cortante a lo largo de una superficie de deslizamiento potencial.

Se supone que el suelo en la zona de falla se encuentra en un estado de equilibrio plástico, y en el análisis el comportamiento del suelo se define con un valor de resistencia a la condición de falla a lo largo de la superficie de deslizamiento. Con la comparación entre los esfuerzos reales sobre la superficie de deslizamiento potencial con aquello necesario para generar la falla, se obtiene un factor de seguridad con respecto a la inestabilidad.

La segunda categoría la constituyen los problemas de distribución de esfuerzos y de deformaciones, en los que el interés está centrado en la predicción de esfuerzos y deformaciones (por lo general, asentamientos) en el suelo cuando los niveles de esfuerzos se restringen a un rango de trabajo muy por debajo del valor de falla y dentro de la parte inicial, aproximadamente lineal, de la curva esfuerzo-deformación. Para estas condiciones se supone que el suelo se encuentra en un estado en equilibrio elástico y las distribuciones de esfuerzos y las deformaciones se determinan bajo el supuesto de que el suelo se comporta como un material homogéneo, isotrópico y linealmente elástico, cuyas propiedades se definen con el modulo de elasticidad, E , y la relación de Poisson, μ .

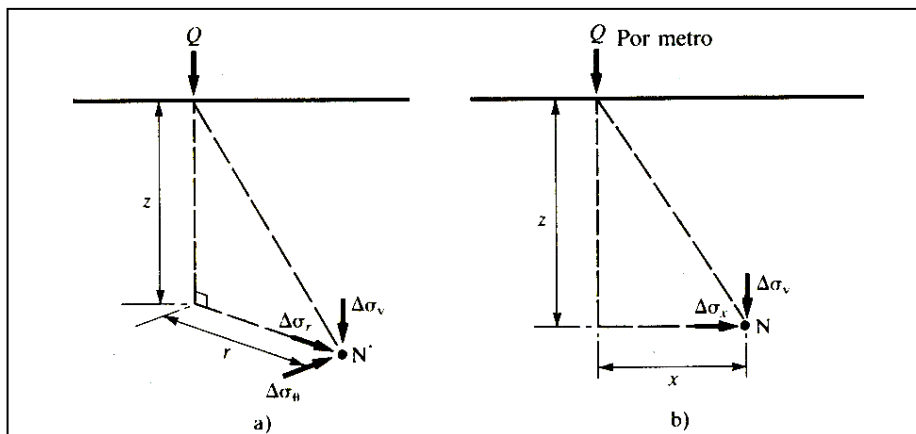
Las condiciones complejas de carga con frecuencia pueden tratarse como una combinación de dos o más de estos casos simples de carga, y su solución puede obtenerse aplicando el principio de superposición. Los cambios de esfuerzo debidos a la descarga, por ejemplo, en excavaciones, pueden calcularse simplemente con una carga negativa aplicada sobre el área de excavación.

1.5 Incremento del esfuerzo vertical debido a diferentes tipos de carga

1.5.1 Debido a una carga puntual

Ocurre por la aplicación de una carga puntual en la superficie y para comprender y conocer las expresiones del cálculo de dicho incremento es necesario analizar la Figura 7.

Figura 7. Incremento del esfuerzo vertical debido a carga puntual



Fuente: Peter Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Pág. 60

Las expresiones para el incremento de esfuerzo en el punto N en una masa de suelo debido a una carga puntual Q , son las siguientes:

$$\Delta\sigma_v = \frac{3Q}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}}$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{3r^2 z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1 - 2\mu}{r^2 + z^2 + z\sqrt{r^2 + z^2}} \right]$$

$$\Delta\sigma_\theta = -\frac{Q}{2\pi} (1 - 2\mu) \left[\frac{z}{(r^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{1}{r^2 + z^2 + z\sqrt{r^2 + z^2}} \right]$$

$$\Delta\tau_{rz} = \frac{3Q}{2\pi} \frac{rz^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}}$$

Donde: z = profundidad desde la superficie del suelo hasta el punto N

r = distancia radial desde N hasta la línea de acción de Q

μ = relación de Poisson

1.5.2 Debido a una carga lineal vertical de longitud infinita

Los incrementos del esfuerzo vertical en N debidos a la aplicación de una carga lineal de Q por metro, y analizando de nuevo la Figura 7b son:

$$\Delta\sigma_v = \frac{2Q}{\pi} \frac{z^3}{(x^2 + z^2)^2}$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{2Q}{\pi} \frac{x^2 z}{(x^2 + z^2)^2}$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{2Q}{\pi} \frac{xz^2}{(x^2 + z^2)^2}$$

1.5.3 Debido a un área circular uniformemente cargada

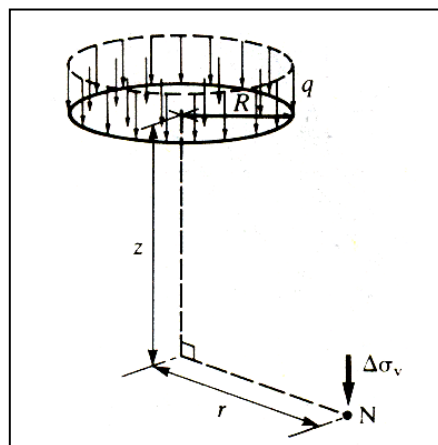
El incremento del esfuerzo vertical total a una profundidad z bajo el centro de un área circular flexible de radio R cargada con una presión uniforme q está dado por la expresión:

$$\Delta\sigma_v = q \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + (R/z)^2} \right]^{3/2} \right\}$$

Sin embargo, para puntos diferentes de los situados bajo el centro de carga, las soluciones tienen una forma extremadamente complicada, y por lo general se presentan en forma gráfica o en tablas. En el punto N de la Figura 8, puede escribirse el incremento en el esfuerzo vertical total como:

$$\Delta\sigma_v = qI_C$$

Figura 8. Incremento del esfuerzo vertical debido a un área circular uniformemente cargada



Fuente: Peter Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Pág. 64

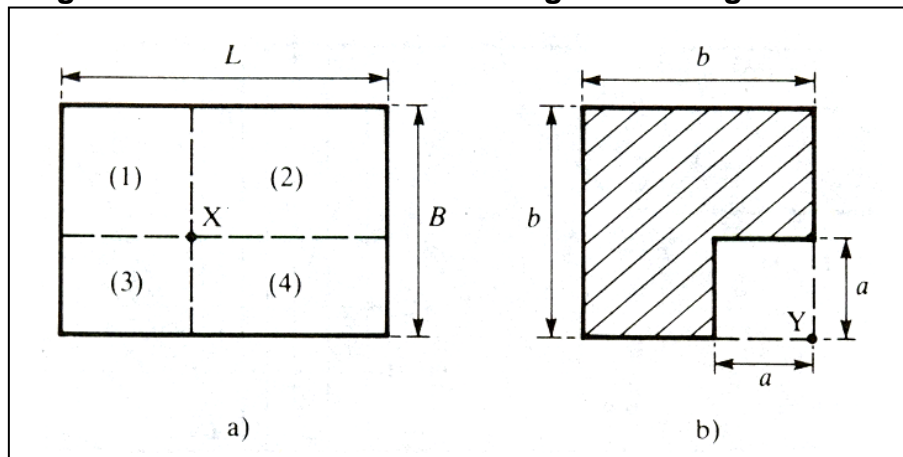
1.5.4 Debido a un área cargada rectangularmente

En este caso se presenta la solución para el incremento de esfuerzo vertical total en un punto N debajo de una esquina de un área rectangular flexible uniformemente cargada. La solución puede expresarse de la forma $\Delta\sigma_V = qI_\sigma$, donde I_σ es un factor de influencia de esfuerzo, que depende de la longitud L y del ancho B del área rectangular y de la profanidad z del punto N .

Para calcular el incremento del esfuerzo vertical en un punto esquinero, por superposición $\Delta\sigma_V$ puede calcularse con facilidad para cualquier punto en la masa de suelo debido a cualquier área uniformemente cargada que pueda subdividirse en rectángulos. Por debajo del punto X en la Figura 9a, el incremento del esfuerzo debido al área cargada $L \times B$ se calcula a partir de:

$$\Delta\sigma_V = \Delta\sigma_{V(Area1)} + \Delta\sigma_{V(Area2)} + \Delta\sigma_{V(Area3)} + \Delta\sigma_{V(Area4)}$$

Figura 9. Distribución del área cargada rectangularmente



Fuente: Peter Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Pág. 64

De igual manera, por debajo del punto Y en la Figura 9b, el incremento de esfuerzo debido a la aplicación de una carga sobre el área sombreada se calcula a partir de:

$$\Delta\sigma_V = \Delta\sigma_{V(Area_{bxb})} - \Delta\sigma_{V(Area_{axa})}$$

1.6 Teoría de la consolidación

Todos los materiales experimentan deformación cuando se les sujeta a un cambio en sus condiciones de esfuerzo. Las características de esfuerzo-deformación de los materiales estructurales tales como el acero y el concreto son hoy suficientemente bien comprendidas para la mayoría de las aplicaciones prácticas y pueden determinarse en el laboratorio con razonable grado de confianza.

La deformación de la mayoría de los suelos, aun bajo cargas pequeñas, es mucho mayor que la de los materiales estructurales; además esa deformación no se produce, usualmente, en forma simultánea a la aplicación de la carga, sino que se desarrolla en el transcurso del tiempo. Así, cuando un estrato de arcilla soporta un edificio, pueden ser necesarios muchos años para que la deformación del suelo se complete. Es cierto que los materiales estructurales también muestran una pequeña capacidad de seguirse deformando bajo carga constante; sin embargo, desde el punto de vista del ingeniero civil, estas deformaciones en los materiales estructurales son de menor importancia y, en general, contribuyen a producir distribuciones de esfuerzo más favorables.

En contraste a esto, el proceso de deformación de las arcillas tiene lugar casi completamente en un largo lapso posterior a la aplicación de la carga propiamente dicha; como resultado, es posible que el agrietamiento de una estructura pueda ocurrir años más tarde de su construcción, sin que el proyectista pueda preverlo, a no ser que tenga presente en forma correcta el comportamiento de los suelos. Otra diferencia entre los materiales estructurales y los suelos estriba en el hecho de que en los primeros la deformación es principalmente resultado de un cambio de forma, sin variación de volumen, mientras que en los suelos ambos fenómenos son importantes; en algunos problemas, particularmente en el asentamiento de edificios construidos sobre arcilla, la deformación debida a cambio volumétrico en los estratos de suelo subyacente, es mucho más importante que la deformación debida a cambio de forma.

La compresión (o expansión) o deformación sólo por cambios de volumen es el proceso por el que una masa de suelo cambia de volumen, manteniendo su forma; todo sucede como si estuviese cambiando la escala del espacio tridimensional. La distancia entre los puntos cambia, pero se mantiene su posición relativa. La distorsión o deformación desviadora es el proceso por el que una masa de suelo cambia de forma, variando la posición relativa de sus puntos, pero manteniéndose su volumen constante.

Los procesos reales de deformación pueden siempre descomponerse en esas dos facetas; hay una componente volumétrica de la deformación y otra desviadora; el proceso real puede así considerarse siempre como una adición de ambas componentes.

Para fines prácticos puede considerarse que los suelos no tienen resistencia a la tensión, las características de deformación bajo compresión son las de mayor interés.

Por ello los principales métodos de prueba están diseñados para someter las muestras de suelo a esfuerzos de compresión. Teóricamente podrían encontrarse todas las características esfuerzo-deformación útiles para describir el comportamiento mecánico de los suelos únicamente utilizando las llamadas pruebas de compresión triaxial. En este tipo de prueba se pueden variar los esfuerzos principales actuantes sobre el suelo a voluntad, produciendo así cualquier combinación deseada de esfuerzos normales y tangenciales en la muestra. Normalmente en los aparatos de compresión triaxial desarrollados hoy con amplitud, dos de los esfuerzos principales son iguales y se producen por la presión de un líquido que rodea a un espécimen cilíndrico o prismático. Si esta prueba de compresión se ejecuta sin presión de líquido y en forma similar a la que se realiza sobre un espécimen cilíndrico de concreto, se llama prueba de compresión simple.

La compresibilidad se centra en el estudio de las variaciones de dimensión del suelo, (preferentemente en lo referente a su altura), en función de las cargas o esfuerzos aplicados al suelo. El estudio de la compresibilidad se realiza fundamentalmente para arcillas o suelos arcillosos, y en estado de saturación. Cuando el incremento de carga es asumido conjuntamente por las partículas minerales y el agua -que conforman el total del suelo-, la variación de presión intersticial, o presión de poro, obliga al agua a moverse a través del suelo, hasta disipar esa sobrepresión intersticial, con lo cual muchas propiedades del suelo varían con el tiempo en que se produce este fenómeno.

En otro tipo de prueba de compresión, que es de particular importancia en la determinación de las características de los suelos finos compresibles, la muestra se confina lateralmente con un anillo metálico, colocándose entre dos piedras porosas; esta prueba se llama de compresión confinada, o lo que es más común, prueba de consolidación. La muestra no puede deformarse lateralmente, como en el caso de las pruebas anteriores, pues este movimiento está totalmente impedido por el anillo, se puede medir únicamente la relación entre esfuerzo, volumen y tiempo.

La expulsión de agua de los poros, que permite el reajuste de las partículas sólidas en los huecos que han quedado vacíos, es la base del fenómeno de la consolidación. Si las sobrepresiones intersticiales son positivas, y en consecuencia el suelo disminuye de volumen, el proceso se denomina consolidación. Si las sobrepresiones intersticiales son negativas, de modo que el suelo tiende a aumentar su volumen, el proceso se denomina expansión. El tema de la consolidación es similar al de la compresibilidad pero con una variable adicional en su estudio: el tiempo.

1.6.1 Consolidación primaria

Al observar los depósitos de material muy suave situados en el fondo de una masa de agua, por ejemplo, un lago, se nota que el suelo reduce su volumen conforme pasa el tiempo y aumentan las cargas por sedimentación sucesiva. A un proceso de disminución de volumen, que tenga lugar en un lapso, provocado por un aumento de las cargas sobre el suelo, se le llama proceso de consolidación ⁽²⁾.

Frecuentemente ocurre que durante el proceso de consolidación la posición relativa de las partículas sólidas sobre un mismo plano horizontal permanece esencialmente la misma; así, el movimiento de las partículas de suelo puede ocurrir sólo en dirección vertical; ésta es la consolidación unidireccional o unidimensional. En el caso citado arriba, por ejemplo, la consolidación sería de este tipo, considerando que los estratos depositados tienen gran extensión horizontal, en comparación con su espesor. En la consolidación unidimensional, por lo tanto, el volumen de la masa de suelo disminuye, pero los desplazamientos horizontales de las partículas sólidas son nulos.

Si eventualmente, el anterior material depositado llega a subyacer en el lugar donde se construye una estructura y se observa el comportamiento ulterior del suelo, podrá notarse que los estratos se comprimen aún más, bajo las nuevas cargas que se les comunica. El que los desplazamientos horizontales de la arcilla sean o no esencialmente nulos, dependerá de varios factores. Si el estrato de arcilla es relativamente delgado y está confinado entre estratos de arena o grava o de materiales más rígidos, o si el estrato de arcilla, aun siendo grueso, contiene gran cantidad de capas delgadas de arena, ocurre que la deformación lateral de la arcilla se restringe tanto que puede despreciarse, en comparación a los desplazamientos verticales.

En estos casos, las características de la consolidación de los estratos de arcilla pueden investigarse cuantitativamente con aproximación razonable, realizando la prueba de consolidación unidimensional sobre especímenes representativos del suelo, extraídos en forma tan inalterada como sea posible.

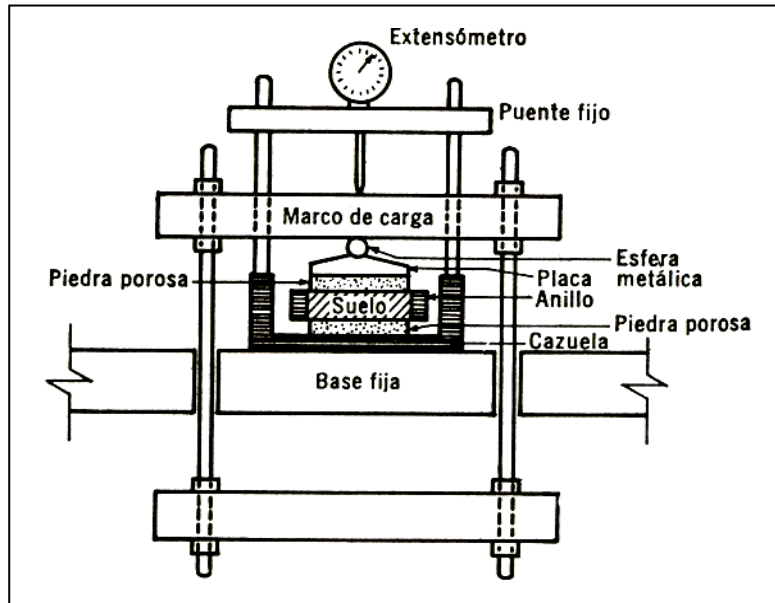
Se puede así calcular la magnitud y la velocidad de los asentamientos probables debidos a las cargas aplicadas. Desde luego es cierto que en las pruebas de laboratorio hechas con muestras pequeñas se produce la consolidación en tiempos muy cortos en comparación con el tiempo en que el estrato real de arcilla se consolidará bajo la carga de la estructura. De hecho, en la aplicación de las teóricas a la práctica de la Mecánica de Suelos, se supone que todas las constantes de consolidación son las mismas en el proceso rápido de laboratorio, que en el mucho más lento que tiene lugar en la naturaleza. Si éste es el caso o no, no se sabe en la actualidad. Es posible que lo anterior sea uno de los factores que influyen en el hecho observado de que los asentamientos predichos son mayores que los reales.

1.6.2 Pruebas de consolidación unidimensional

Una prueba de consolidación unidimensional estándar se realiza sobre una muestra labrada en forma de cilindro aplastado, es decir de pequeña altura en comparación al diámetro de la sección recta.

La muestra se coloca en el interior de un anillo, generalmente de bronce que le proporciona un completo confinamiento lateral. El anillo se coloca entre dos piedras porosas, una en cada cara de la muestra; las piedras son de sección circular y de diámetro ligeramente menor que el diámetro interior del anillo.

Figura 10. Detalle de la colocación de la muestra en el consolidómetro de anillo flotante



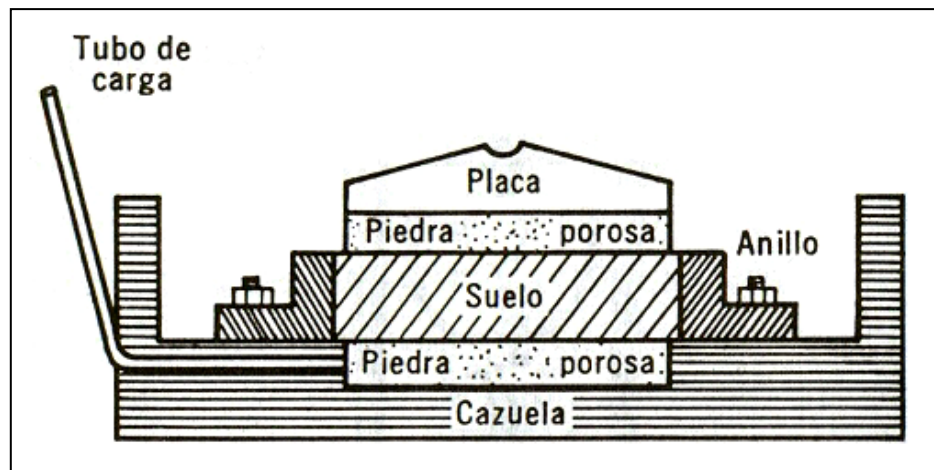
Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. **Mecánica de Suelos**. Pág. 248

El conjunto se coloca en la cazuela de un consolidómetro. El consolidómetro mostrado anteriormente en la Figura 10, es el de tipo de “anillo flotante”, hoy principalmente usado y así llamado porque se puede desplazar durante la consolidación del suelo.

Por medio del marco de carga, se aplican cargas a la muestra, repartiéndolas uniformemente en toda su área con el dispositivo formado por la esfera metálica y la placa colocada sobre la piedra porosa superior. Un extensómetro apoyado en el marco de carga móvil y ligado a la cazuela fija, permite llevar un registro de las deformaciones en el suelo. Las cargas se aplican en incremento, permitiendo que cada incremento obre por un período de tiempo suficiente para que la velocidad de deformación se reduzca prácticamente a cero.

En la Figura 11 se muestra esquemáticamente la colocación de la muestra en un consolidómetro de anillo fijo, poco usado actualmente excepto para la realización de pruebas de permeabilidad ejecutadas simultáneamente con la de consolidación.

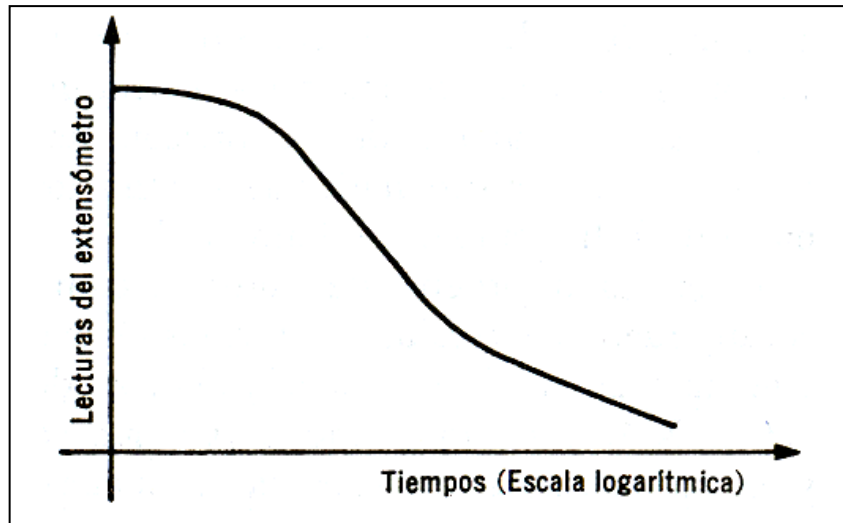
Figura 11. Detalle de la colocación de la muestra en el consolidómetro de anillo fijo



Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. **Mecánica de Suelos**. Pág. 250

En cada incremento de carga se hacen lecturas en el extensómetro para conocer la deformación correspondiente a diferentes tiempos. Los datos de estas lecturas se dibujan en una gráfica que tenga por abscisas los valores de los tiempos transcurridos, en escala logarítmica y como ordenadas las correspondientes lecturas del extensómetro, en escala natural. Estas curvas se llaman de consolidación y se obtiene una para cada incremento de carga aplicado. En la Figura 12 se muestra la forma típica (fuera de escala) de una de estas curvas.

Figura 12. Forma típica de la curva de consolidación en arcillas (fuera de escala)



Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. **Mecánica de Suelos**. Pág. 251

En rigor, la prueba de consolidación, tal como se hace en un consolidómetro, hace disminuir el volumen de la muestra por acortamientos de la altura, pero sin cambio en la sección transversal; por lo tanto, tomando en cuenta las definiciones de deformación volumétrica y desviadora, se ve que ambas ocurren; a todo nuevo volumen de la muestra le corresponde una nueva forma.

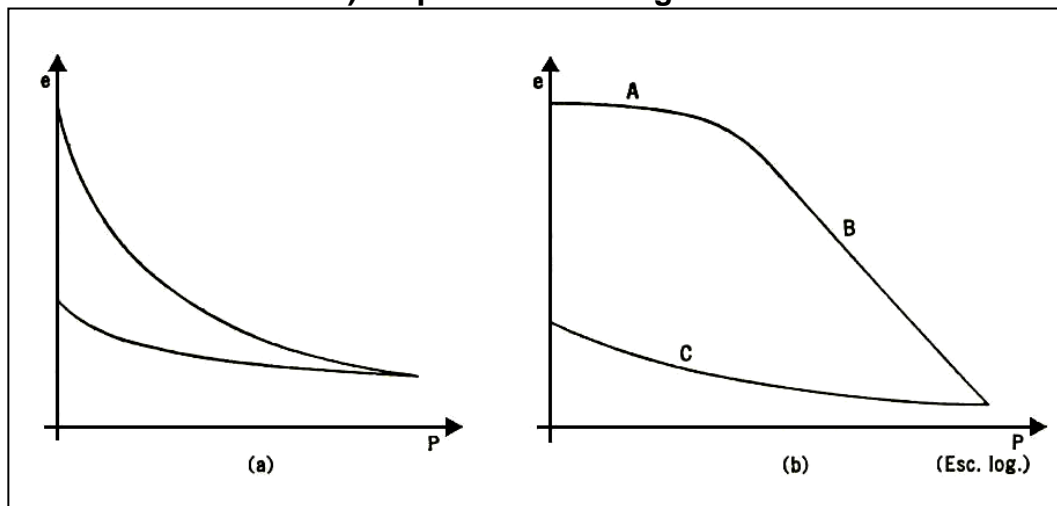
La aceptación de la prueba se debe a su facilidad, respecto a una ideal en que sólo hubiera cambio de volumen, prueba que sería difícil de realizar. Por otra parte, todo parece indicar que la compresibilidad volumétrica del suelo en el consolidómetro es similar a la que se manifestaría en condiciones de aplicación de la misma presión por igual en todas direcciones, en la forma en que se ocurriría hacerlo en la prueba ideal, quizá sobre un espécimen esférico.

Una vez que el suelo alcanza su máxima deformación bajo un incremento de carga aplicado, su relación de vacíos llega a un valor menor, evidentemente, que el inicial y que puede determinarse a partir de los datos iniciales de la muestra y las lecturas del extensómetro. Así, para cada incremento de carga aplicado se tiene finalmente un valor de la relación de vacíos y otro de la presión correspondiente actuante sobre el espécimen. En suma, de toda la prueba, una vez aplicados todos los incrementos de carga; se tienen valores para construir una gráfica en cuyas abscisas se ponen los valores de la presión actuante, en escala natural o logarítmica y en cuyas ordenadas se anotan los correspondientes valores de e en escala natural. Estas curvas se llaman de compresibilidad y de ellas se obtiene una en cada prueba de consolidación completa. En la Figura 13 se muestran, fuera de escala, las formas típicas de estas curvas.

Figura 13. Forma típica de la curva de compresibilidad en suelos compresibles

a) Representación aritmética

b) Representación logarítmica



Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. **Mecánica de Suelos**. Pág. 251

Generalmente, en una curva de compresibilidad se definen tres tramos diferentes. El A es un tramo curvo que comienza en forma casi horizontal y cuya curvatura es progresiva, alcanzando su máximo en la proximidad de su unión con el tramo B. El tramo B es generalmente un tramo recto muy aproximadamente y con él se llega al final de la etapa de carga de la prueba, al aplicar el máximo incremento de carga, al cual corresponde la máxima presión sobre la muestra.

A partir de este punto es común en la prueba de consolidación someter el espécimen a una segunda etapa, ahora de descarga, en la que se sujeta al espécimen a cargas decrecientes, permaneciendo cada decremento al tiempo suficiente para que la velocidad de deformación se reduzca prácticamente a cero; en esta etapa se tiene una recuperación del espécimen, si bien éste nunca llega de nuevo a su relación de vacíos inicial; el tramo C corresponde a esta segunda etapa, con el espécimen llevado a carga final nula, como es usual.

1.6.3 Consolidación secundaria

La consolidación secundaria es un fenómeno de flujo viscoso. El efecto se atribuye generalmente, al deslizamiento progresivo diferido en el tiempo, entre las partículas del material que se reacomodan, tendiendo a estados más compactos, para adaptarse a la nueva condición de carga. Posiblemente puede contribuir también alguna clase de flujo plástico de las partículas laminares constitutivas de los suelos arcillosos.

Cuando las deformaciones plásticas de las partículas aisladas o los deslizamientos relativos entre ellas se hacen comparables a la velocidad de expulsión del agua del volumen decreciente de los vacíos entre las partículas, es cuando el efecto se hace notable y esto se refleja en las curvas de consolidación, dando lugar al tramo final típico, sensiblemente recto en trazado semilogarítmico.

Los factores que afectan la velocidad de consolidación secundaria de los suelos, no están totalmente dilucidados a la fecha y no se ha desarrollado aún ningún método de análisis del fenómeno suficientemente correlacionado con la realidad, que sirva para predecir la magnitud de estos efectos en la práctica.

1.7 Prueba de consolidación en laboratorio

1.7.1 Descripción general

El objeto de una prueba de consolidación es determinar el decremento de volumen y la velocidad con que este decremento se produce, en un espécimen de suelo, confinado lateralmente y sujeto a una carga axial. Durante la prueba se aplica una serie de incrementos crecientes de carga axial y, por efecto de éstos, el agua tiende a salir del espécimen a través de piedras porosas colocadas en sus caras. El cambio de volumen se mide con un micrómetro montado en un puente fijo y conectado a la placa de carga sobre la piedra porosa superior.

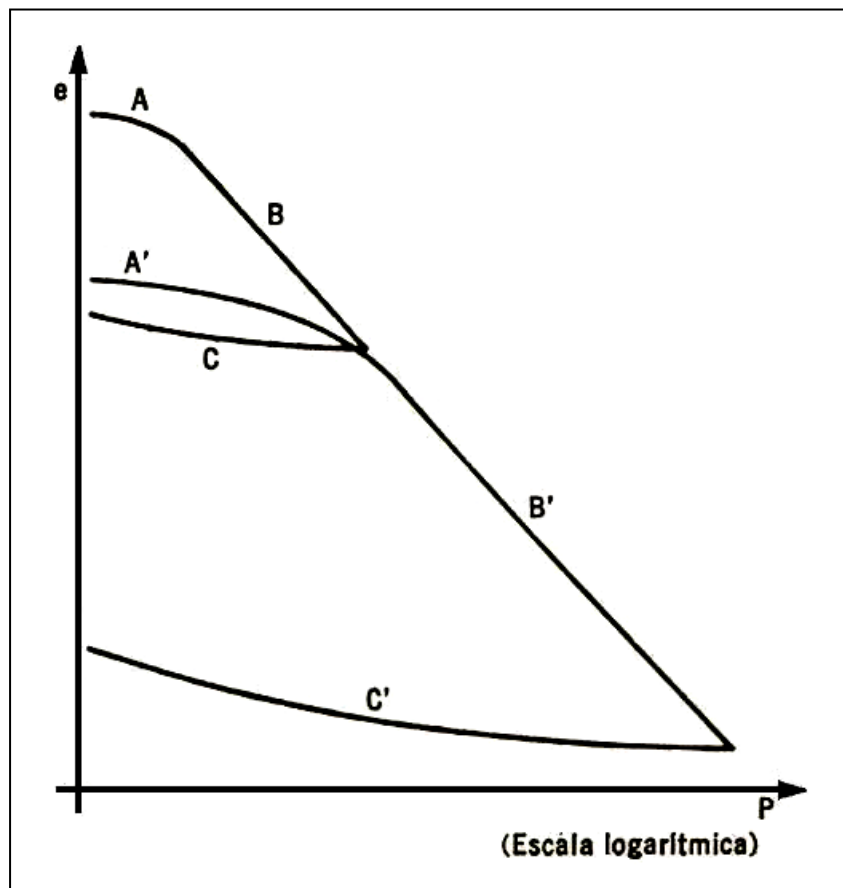
Para cada incremento de carga aplicada se miden los cambios volumétricos, usando intervalos apropiados para efectuar las mediciones. Los datos registrados conducen a la obtención de la curva de consolidación. Dibujando las lecturas del micrómetro como ordenadas, en escala natural y los tiempos, como abscisas, en escala logarítmica, se logra que la curva de consolidación obtenida en el laboratorio sea fácilmente comparable con la curva teórica, lo cual permite establecer, toscamente, el grado de aplicabilidad de las teorías al problema específico tratado.

Es común encontrar, en la mayoría de los suelos arcillosos de alta plasticidad, una concordancia excelente hasta un 60% ó 70% de consolidación; adelante de estos límites, la curva de laboratorio suele volverse asintótica a una recta inclinada respecto a la línea horizontal por el valor 100% de consolidación de la curva teórica. Esta desviación corresponde a la consolidación secundaria y esta deformación adicional se atribuye, por hipótesis, a un reajuste de las fuerzas de fricción dentro de la masa de suelo. Puesto que este cambio volumétrico secundario es generalmente muy pequeño (por lo menos para incrementos de carga relativamente importantes) en comparación con el que tiene lugar durante el efecto primario de expulsión de agua, su influencia se hace notoria sólo después de que se ha producido la mayor parte de la deformación volumétrica primaria.

Al realizar la prueba de consolidación en laboratorio, cada incremento de carga se mantiene el tiempo suficiente para que el tramo recto de consolidación secundaria se defina claramente; después de lo cual, se podrá aplicar el siguiente incremento.

En las curvas de consolidación obtenidas para cada incremento de carga se selecciona un tiempo arbitrario, tal que las lecturas del micrómetro en las diferentes curvas caigan ya más allá del período de consolidación primaria. La presión y la lectura del micrómetro correspondientes a ese tiempo proporcionan los datos de partida para el trazado de las curvas de compresibilidad. En la Figura 14 se muestra la curva de compresibilidad para dos procesos de carga y descarga consecutivos.

Figura 14. Curva de compresibilidad



Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. **Mecánica de Suelos**. Pág. 252

1.7.2 Equipo para la prueba de consolidación en laboratorio

- Consolidómetro, incluyendo el anillo para la ubicación de la muestra
- Deformímetro de carátula con lectura de 0.01 mm de precisión
- Equipo de cargas
- Cronómetro de bolsillo o de pared
- Equipo adicional tal como cortadores para labrar el espécimen, taras, horno y balanzas.

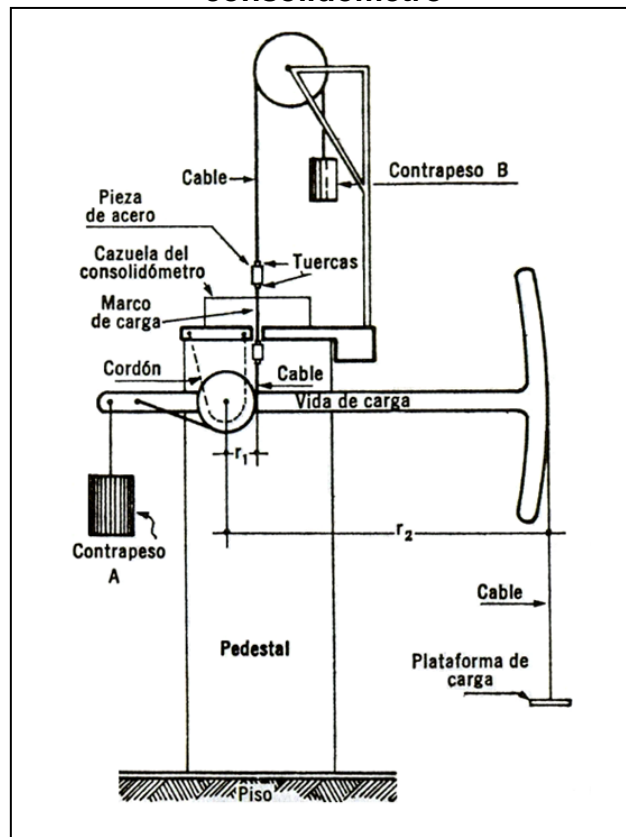
1.7.3 Descripción del mecanismo de transmisión de carga y calibración del aparato

La carga se aplica por medio de pesos colocados en una ménsula que cuelga del extremo de la viga de carga. La carga se transmite al marco por medio de un cable apoyado en una rótula fija de radio r_1 , ligada al pedestal del aparato. La viga de carga puede girar en torno a esta rótula. La relación del brazo de palanca de la ménsula de carga, r_2 , y del radio r_1 , antes mencionado, suele ser del orden de 10 y ésta es la razón de multiplicación de cargas del aparato.

El peso de la viga y la ménsula de carga se balancean con el contrapeso A. El peso del marco de carga se balancea, a su vez, con el contrapeso B. La posición del marco de carga respecto a la cazuela puede ajustarse usando las tuercas de las barras laterales del marco.

Para dejar el aparato listo para el uso preciso, obtener una curva de calibración; es decir, una curva que dé las deformaciones propias, sin muestra. Estas deformaciones deberán restarse a las obtenidas en una prueba, a fin de llegar a las deformaciones de la muestra sola. La curva se obtiene sujetando al conjunto de las piedras porosas, placa de carga, etc., sin muestra, a una prueba de consolidación y dibujando las lecturas del micrómetro contra las correspondientes cargas, en escala aritmética, usualmente. En la Figura 15 se presenta un esquema del dispositivo de transmisión de cargas de un consolidómetro.

Figura 15. Esquema del mecanismo de transmisión de carga de un consolidómetro



Fuente: Juárez Badillo y Rico Rodríguez. **Mecánica de Suelos**. Pág. 251

1.7.4 Preparación de la muestra

Para preparar una muestra inalterada es esencial cortar un fragmento cuyo volumen sea el del anillo de consolidación. Para una buena manipulación se recomienda el uso de un aparato cortador adecuado. A fin de evitar la evaporación, es recomendable preparar el espécimen en un cuarto húmedo. Al mismo tiempo que se prepara la muestra de consolidación es necesario formar una muestra representativa para la determinación del peso específico relativo y es conveniente obtener muestras para la realización de pruebas de límites de plasticidad. El procedimiento detallado para la obtención de una muestra para pruebas de consolidación deberá ajustarse a lo que sigue:

1. Determinar y anotar el peso propio del anillo para confinar la muestra. Hacer lo mismo con el área y la altura del anillo.
2. Colocar una masa de arcilla inalterada del tamaño apropiado en el anillo de consolidación y, girando el anillo, cortar la muestra con un cortador hasta sus dimensiones correctas. En arcillas blandas resulta bien hacer girar el anillo manualmente, retirando el material sobrante con ligeros cortes de ajuste; en materiales duros puede hacerse necesario manipular la muestra mecánicamente, ajustándola al anillo, después de haber obtenido un cilindro del diámetro apropiado; en este caso debe tenerse cuidado de que la muestra no pierda agua por evaporación. Continúese el labrado de la muestra hasta que su base sobresalga algo por la cara inferior del anillo.

3. Retirar la porción de la muestra que sobresalga por la caras superior del anillo, hasta lograr una superficie continua a nivel; para esto puede usarse un pedazo de alambre, en muestras suaves, o un cuchillo para muestra más duras; afinar cuidadosamente usando una regla metálica recta.
4. Anotar una muy cuidadosa y detallada descripción de la muestra.
5. Usando una balanza, pesar cuidadosamente el conjunto de la muestra y el anillo.
6. Colocar y centrar cuidadosamente las piedras porosas ligeramente humedecidas en las bases del anillo, presionándolas muy suavemente contra la muestra, a fin de lograr que se adhieran.
7. Colocar ahora con cuidado el anillo en la cazuela del consolidómetro, cuidando que el anillo ya no sufra ningún movimiento, una vez colocado.

1.7.5 Montaje de la prueba de consolidación

El montaje de la prueba de consolidación se ajustará a lo siguiente:

1. Con gran cuidado, a fin de evitar movimientos del anillo y de las piedras porosas en la cazuela, colocar ésta sobre la plataforma del banco de consolidación y centrar cuidadosamente la piedra porosa superior bajo el marco de carga.

2. Balancear la palanca de carga y ajustar la elevación de la pieza transversal superior del marco de carga, hasta que el marco quede en contacto con la pequeña esfera metálica alojada en la muesca de la placa de carga (un pequeño peso que actúe sobre el marco de carga hará el contacto estable) previamente colocada sobre la piedra porosa superior. Comprobar la horizontalidad de la pieza superior del marco de carga.
3. Colocar el micrómetro, atornillando el puente que lo sostiene y poniéndolo en contacto con el marco de carga; poner el micrómetro en cero.

1.7.6 Procedimiento de la prueba de consolidación

1. Retirando el pequeño peso actuante sobre el marco de carga, colocar en la ménsula el primer incremento de carga, evitando que el marco cause impacto sobre la muestra y usando los pesos apropiados. Anotar esa carga. La magnitud de la presión a que primeramente se sujete la muestra depende de varias consideraciones. Debe escogerse una carga bastante pequeña, tal que dé una presión que haga que la muestra no fluya a través del espacio libre entre la piedra porosa y el anillo. Además, puesto que en la teoría se suponen constantes tanto la relación de vacíos como el coeficiente de permeabilidad durante el tiempo en que actúa el incremento de carga, no se tendría buena concordancia entre las curvas de laboratorio y la teoría si se escogieran incrementos de carga demasiado grandes.

2. Por otra parte, si los incrementos son demasiado pequeños, la consolidación secundaria, que es independiente de la magnitud de ellos haría poco notorios los efectos primarios. Después de que la muestra haya sido consolidada bajo el primer incremento, cada incremento sucesivo será tal que la carga se vaya duplicando. En suelos muy blandos es conveniente dividir la colocación de la primera carga en cuatro etapas, con media hora de intervalo y colocando cada vez una cuarta parte de la carga. Al colocar las cargas en la ménsula deberá siempre evitarse el impacto. Las pesas ranuradas, de uso común, deben colocarse con sus ranuras cuatroleadas, para evitar su deslizamiento de la ménsula, por inclinación de ésta.
3. Observar y anotar las lecturas del micrómetro en intervalos de tiempo adecuados. Es útil la siguiente secuencia: 6 segundos, 15 segundos, 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, etc. No es fundamental ceñirse a una cierta secuela, pero sí lo es medir correctamente el tiempo transcurrido desde el principio hasta el instante en que se hace cada lectura.
4. Dibujar la curva de consolidación (trazo semilogarítmico).
5. Una vez que en la curva de consolidación se define claramente el tramo recto de consolidación secundaria, se considera que se ha completado la primaria; proceder entonces a la colocación del segundo incremento de carga, repitiendo los puntos 3 y 4. Y así proceder sucesivamente hasta completar la prueba en lo referente a ciclo de carga.

6. Observando todas las curvas de consolidación obtenidas, seleccionar un tiempo correspondiente a un punto que caiga en el tramo de consolidación secundaria de todas ellas. Anotar las presiones y las lecturas del micrómetro, usando las curvas correspondientes a ese tiempo escogido, interpolando en las curvas. Estos datos pueden dibujarse en trazo semilogarítmico, con las presiones en escala logarítmica y las lecturas en escala natural. La forma de la curva así obtenida es similar a la de la curva de compresibilidad, que se dibujará posteriormente. Del análisis de la curva es posible ver si la prueba se ha desarrollado lo suficiente para los propósitos que se persiguen. Siempre que sea posible, es deseable continuar aplicando incrementos de carga hasta que la porción recta del trazado semilogarítmico recién dibujado, se defina netamente. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que los consolidómetros normales tienen una capacidad máxima en la ménsula de carga, de 100 a 150 Kg.
7. Una vez aplicados todos los incrementos de carga necesarios, según la información proporcionada por la curva presión-lecturas del micrómetro, mencionada en el paso 6, quitar las cargas en decrementos; generalmente se quitan las tres cuartas partes de la presión total en el primer decremento y después, en cada uno de los restantes, se retira la mitad de la carga que reste.
8. Hacer lecturas en diferentes tiempos para cada carga actuante en el ciclo de descarga, dibujando las curvas de expansión, análogas a las anteriores de consolidación. El criterio para fijar el tiempo en el que se hagan las remociones de carga sucesivas, es el mismo que el establecido para la aplicación de los incrementos en el ciclo de consolidación.

9. Después de retirar toda la carga, permitir que la muestra se expanda descargada durante 48 horas o, preferiblemente, hasta que no se registre expansión en el micrómetro en un período de 24 horas. Si se deseara someter a la misma muestra a otros ciclos de recompresión y repetir las etapas 1 a 8.
10. Al terminar la prueba, quitar el micrómetro y desarmar el consolidómetro. Cuidadosamente secar el agua del anillo de consolidación y de la superficie de la muestra, cubriendo la muestra y el anillo, luego pesar el conjunto (anotar el dato como: tara más suelo húmedo).
11. Secar la muestra en horno y obtener su peso seco.

1.7.7 Datos de la prueba de consolidación

1. Ejecutar los cálculos que conducen a la determinación de las relaciones como el peso específico húmedo y seco, con los contenidos de agua inicial y final del espécimen y de la altura de sólidos. La relación H_s juntamente con la altura original del espécimen H_1 , se usa en el cálculo de las relaciones de vacíos correspondientes a las lecturas del micrómetros. El propósito del cálculo de los grados de saturación al principio y al final de la prueba es el de obtener una verificación de la exactitud de los datos observados y registrados. Si el grado de saturación calculado al principio de la prueba varía apreciablemente del 100%, ello puede indicar la presencia de gas o aire en la muestra o un error en los datos o cálculos efectuados.

2. Cuando una muestra está totalmente saturada al principio de la prueba, ciertamente lo estará también al final de ella. El cálculo del grado de saturación final requiere tomar en cuenta el cambio de altura del espécimen, que tiene lugar del principio al fin de la prueba; está dado por la variación neta de lecturas inicial y final del micrómetro. Por lo tanto, un valor inapropiado del grado de saturación calculado puede indicar un error en las lecturas micrométricas registradas.
3. La duración de la prueba es el tiempo total transcurrido desde la aplicación del incremento de carga inicial al momento en que se hace la lectura micrométrica final. El intervalo de tiempo entre incrementos de carga usado en los cálculos es el tiempo, arbitrariamente escogido, para el cual se completa la consolidación primaria en todos los incrementos de carga. La corrección por compresión del aparato se obtiene de la curva de calibración a que ya se ha hecho referencia.
4. Dibujar la curva de compresibilidad, en trazo semilogarítmico y determinar la carga de preconsolidación.

1.7.8 Errores posibles

La prueba requiere técnica cuidadosa a fin de asegurar resultados dignos de confianza. Sin embargo, aun con la mejor técnica pueden presentarse errores de importancia; solamente la experiencia permitirá sopesar la magnitud de ellos. Pueden presentarse errores de varias fuentes, siendo estos en la teoría básica, en la preparación de la muestra y en el procedimiento de la prueba.

1.7.8.1 En la teoría básica

La prueba está sujeta a las siguientes hipótesis básicas, en lo que se refiere a la validez de la interpretación de sus resultados:

1. La ley de Darcy es aplicable.
2. La carga de velocidad de agua, $v^2/2g$, es despreciable.
3. H , a_v y k se suponen constantes en cada etapa de la prueba. En arcillas inorgánicas esto introduce un error pequeño, pero en otros suelos puede ser de magnitud considerable.
4. No se consideran los efectos de la consolidación secundaria. Esto puede causar graves errores más allá del 60% de consolidación primaria.
5. Se supone que las constantes de consolidación, obtenidas de la prueba de laboratorio con las mismas que rigen el proceso real que ocurre en la naturaleza, mucho más lento.

1.7.8.2 En la preparación de la muestra

1. La muestra debe estar lo más inalterada que sea posible; muestras alteradas darán resultados erróneos.
2. El volumen de la muestra debe ser exactamente del anillo de consolidación; de otra manera no existirá confinamiento lateral completo.
3. Las muestras adyacentes tomadas para la determinación del peso específico relativo y de los límites de plasticidad pueden ser no representativos de la muestra de consolidación.

4. La muestra debe estar orientada en la misma dirección en que se encuentre en la naturaleza.
5. La muestra debe ser preparada en un cuarto húmedo.

1.7.8.3 En el procedimiento de prueba

1. La muestra no debe sumergirse antes de que la presión aplicada sea igual a las presiones existentes en ella, por efectos capilares.
2. Las pesas deben colocarse en la ménsula de carga cuidadosamente, para evitar impacto; esto implica una dificultad en aplicar la carga en un instante dado.
3. La temperatura varía a través de toda la prueba.
4. Todas las lecturas de tiempos y las micrométricas deben efectuarse con cuidado.
5. Debe evitarse toda excentricidad en las cargas actuantes sobre la muestra.

2. CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN EN SUELOS SATURADOS

En este capítulo se desarrolla un algoritmo sencillo para el cálculo de asentamientos por consolidación en suelos saturados, partiendo del análisis de las diferentes fórmulas para calcular dicho asentamiento, la realización del ensayo de consolidación en laboratorio y la obtención de los datos necesarios para su posterior cálculo.

2.1 Asentamiento por consolidación

El asentamiento por consolidación se da a lo largo del tiempo, y ocurre en suelos arcillosos saturados cuando son sometidos a una carga creciente causada por la construcción de una cimentación.

La consolidación impone la necesidad de evaluar la magnitud y la velocidad de los asentamientos. Si las deformaciones totales del terreno varían en la dirección horizontal, se producen asentamientos diferenciales. Cuando el suelo es altamente deformable, las sobrecargas altas producen asentamientos excesivos. Si el suelo es un limo arenoso, la permeabilidad puede ofrecer asentamientos rápidos que suelen darse durante la construcción. Si el suelo es limo arcilloso, los asentamientos pueden prolongarse una cantidad de tiempo importante después de terminada la obra.

2.1.1 Arcillas normalmente consolidadas y preconsolidadas

Una adecuada evaluación de la historia de las presiones in situ de un estrato de arcilla es necesaria para estimar las características de compresibilidad y resistencia de dicha arcilla. La historia de las presiones se refiere a la presión efectiva vertical existente in situ en relación con la máxima presión del estrato de arcilla en el pasado.

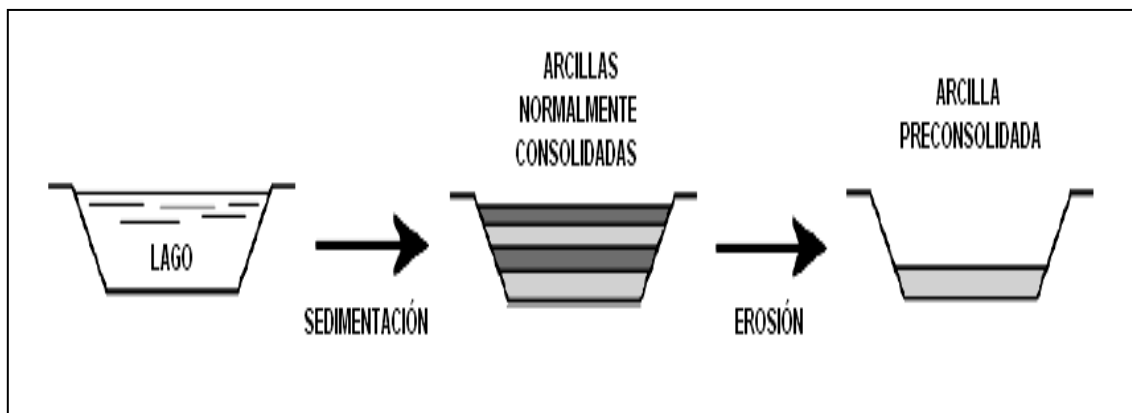
Deben reconocerse dos condiciones diferentes de importancia práctica para un cierto estrato de arcilla:

- Se dice que un estrato está normalmente consolidado (NC), si nunca han actuado en él presiones verticales efectivas mayores que las existentes en la actualidad.
- Se dice que un estrato está preconsolidado (OCR), si en alguna época de su historia estuvo sujeto a presiones verticales efectivas mayores que las actuales. La presión efectiva máxima a que estuvo sometido el estrato de arcilla se denomina presión de preconsolidación.

La causa que ocasiona arcillas normalmente consolidadas y preconsolidadas es el proceso geológico en el cual se produce en primer lugar una sedimentación, por ejemplo en el fondo de un lago o un río, aumentando por ende, las presiones totales y efectivas y por la cual se generan las arcillas normalmente consolidadas ⁽³⁾.

Si posteriormente por erosión se produce una remoción de los depósitos sedimentados, los estratos subyacentes se descargan convirtiéndose en arcillas preconsolidadas. Otras causas de cambio en las presiones que ocasionan arcillas preconsolidadas pueden ser el retiro de estructuras y el proceso de glaciación. El proceso se esquematiza en la Figura 16.

Figura 16. Proceso de formación de arcillas NC y OCR



Fuente: <http://carreras.frba.utn.edu.ar/civil/geotecnia/InformesobreConsolidacion.pdf>

Adicionalmente, cuando la arcilla es preconsolidada, se puede calcular el grado de preconsolidación, el cual se mide por la relación de preconsolidación (en inglés OCR):

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v}$$

Donde:

σ'_p = presión efectiva de consolidación

σ'_v = presión efectiva actual en el estrato

2.1.2 Importancia del estudio de la compresibilidad

El estudio de la compresibilidad de los suelos es de suma importancia por su aplicación en la ingeniería, dado que trata de evaluar dos grandes cuestiones:

1. Cuánto se deforma un estrato bajo una cierta carga
2. Cuánto tiempo tarda en deformarse el estrato

2.1.3 Expresiones para cálculo de asentamientos por consolidación

A partir de la información brindada por las curvas obtenidas de los ensayos de consolidación puede calcularse el asentamiento de un estrato, lo cual contesta la primera de las cuestiones que plantea el estudio de la compresibilidad. El cálculo del asentamiento dependerá de si se trata de una arcilla normalmente consolidada o preconsolidada.

2.1.3.1 Arcillas normalmente consolidadas

La variación de la relación de vacíos con respecto a la presión está dirigida por el índice de compresión (C_c) de la curva de compresibilidad, obtenida en el ensayo de consolidación.

El cálculo del asentamiento por consolidación de un estrato, para arcillas normalmente consolidadas está formulado por:

$$S_C = \frac{C_c H_C}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_v + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_v}$$

Donde:

σ'_v = presión efectiva promedio sobre el estrato de arcilla antes de la construcción de la cimentación

$\Delta \sigma'_v$ = incremento promedio de la presión sobre el estrato de arcilla causada por la construcción de la cimentación

C_c = índice de compresión

H_C = espesor de la capa de arcilla

e_0 = relación de vacíos inicial del estrato de arcilla

2.1.3.2 Arcillas preconsolidadas

El cálculo del asentamiento por consolidación de un estrato, para arcillas preconsolidadas está formulado por:

$$S_C = \frac{C_s H_C}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_v + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_v}$$

Para arcillas preconsolidadas que cumplan con $\sigma'_{vf} < \sigma'_p$

Donde:

$\sigma'_{vf} = \sigma'_v + \Delta \sigma'_v$ = presión final actuante en el estrato

σ'_p = presión de consolidación

σ'_v = presión efectiva promedio sobre el estrato de arcilla antes de la construcción de la cimentación

$\Delta\sigma'_v$ = incremento promedio de la presión sobre el estrato de arcilla causada por la construcción de la cimentación

e_0 = relación de vacíos inicial del estrato de arcilla

C_s = índice de expansibilidad

H_C = espesor de la capa de arcilla

2.1.3.3 Incremento de presión

El incremento de presión $\Delta\sigma'_v$ sobre el estrato de arcilla no es constante con la profundidad. La magnitud de $\Delta\sigma'_v$ decrecerá con el incremento de la profundidad medida desde el fondo de la cimentación. Sin embargo, el incremento promedio de presión puede aproximarse por:

$$\Delta\sigma'_v = \frac{1}{6} (\Delta\sigma'_{vt} + 4\Delta\sigma'_{vm} + \Delta\sigma'_{vb})$$

Donde:

$\Delta\sigma'_{vt}$ = incremento de presión arriba del estrato de arcilla causado por la construcción de la cimentación.

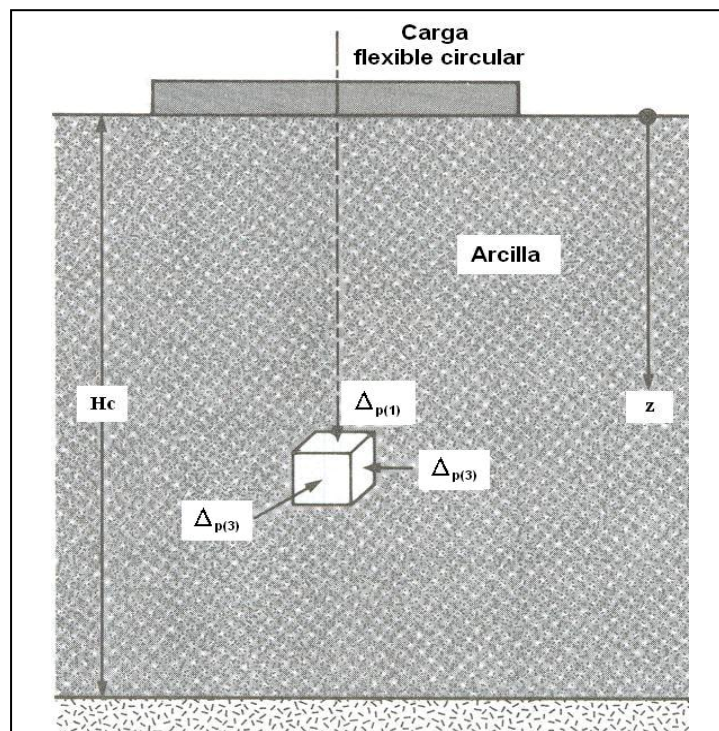
$\Delta\sigma'_{vm}$ = incremento de presión en medio del estrato de arcilla causado por la construcción de la cimentación.

$\Delta\sigma'_{vb}$ = incremento de presión en el fondo del estrato de arcilla causado por la construcción de la cimentación.

2.2 Modificación Skempton-Bjerrum para asentamientos por consolidación

El cálculo de asentamiento por consolidación presentado con anterioridad, se basa en las pruebas unidimensionales de consolidación en laboratorio. Se supone en dicho cálculo, que el incremento de la presión de poro de agua Δu , inmediatamente después de la aplicación de la carga, es igual al incremento del esfuerzo $\Delta \sigma'_v$, en cualquier profundidad. Sin embargo, en el campo, cuando la carga se aplica sobre un área limitada de la superficie del terreno, esta suposición no será correcta. Considérese el caso de una cimentación circular sobre un estrato de arcilla como muestra la Figura 17.

Figura 17. Cimentación circular sobre un estrato de arcilla



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones** Pág. 255

Los incrementos de esfuerzo vertical y horizontal en un punto en el estrato de arcilla inmediatamente abajo del centro de la cimentación son $\Delta_{p(1)}$ y $\Delta_{p(3)}$, respectivamente. Para una arcilla saturada, el incremento de la presión de poro del agua a esa profundidad es:

$$\Delta u = \Delta_{p(3)} + A(\Delta_{p(1)} - \Delta_{p(3)})$$

Donde:

Δu = incremento de presión de poro del agua

$\Delta_{p(1)}$ = incremento de esfuerzo vertical en un punto en el estrato de arcilla

$\Delta_{p(3)}$ = incremento de esfuerzo horizontal en un punto en el estrato de arcilla

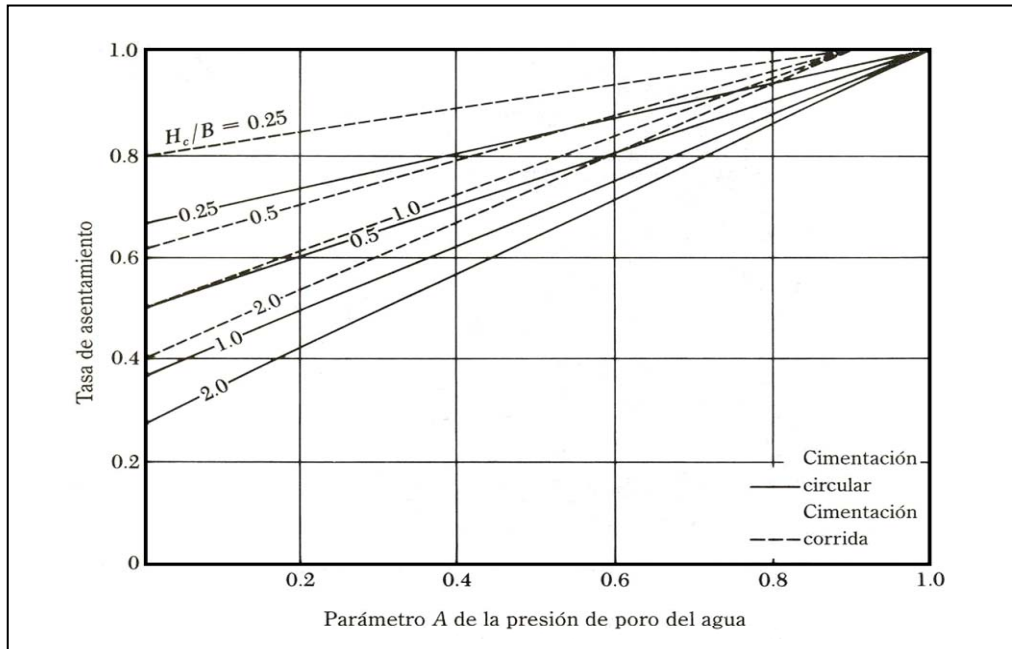
A = parámetro de la presión de poro del agua

A continuación se describe el procedimiento para determinar la modificación Skempton-Bjerrum para asentamientos por consolidación:

1. Determinar el asentamiento por consolidación $S_{C(oed)}$, como se detalló en la sección 2.1.3
2. Determinar el parámetro, A , de la presión de poro del agua
3. Determinar la relación Hc/B
4. Obtener la tasa de asentamiento de la Figura 18. La tasa de asentamiento para una cimentación corrida se determina de manera similar a la de una cimentación circular. La variación de ambas con respecto de A y Hc/B se determina a partir de la Figura 18, estableciendo que B = diámetro de una cimentación circular y B = ancho de una cimentación corrida.
5. Calcular el asentamiento por consolidación

$$S_C = S_{C(oed)} \times \text{tasa de asentamiento}$$

Figura 18. Tasas de asentamiento para cimentaciones circulares y continuas



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones** Pág. 256

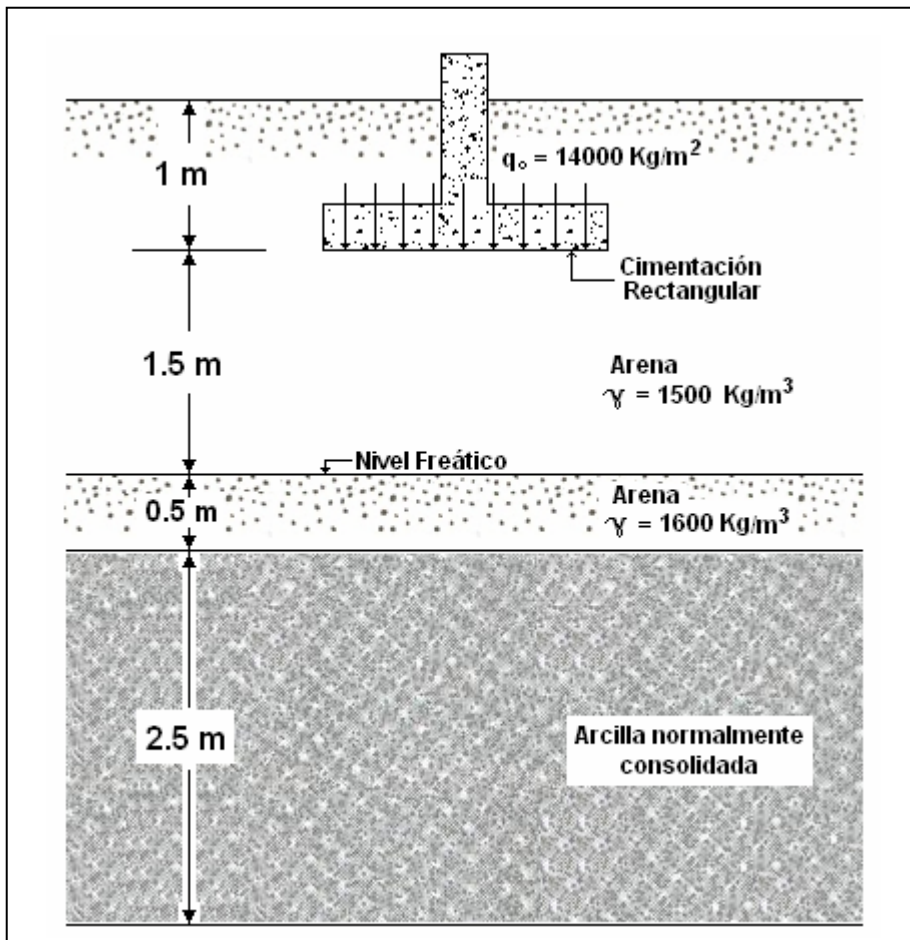
2.3 Ejemplos de cálculo de asentamientos por consolidación con datos de ensayos de laboratorio

Luego de conocer íntegramente todos los conceptos y relaciones utilizadas para calcular el asentamiento por consolidación en diferentes tipos de suelos saturados, se realizará el cálculo experimental de dicho asentamiento, producido por diferentes tipos de cimentaciones, en arcillas normalmente consolidadas y preconsolidadas. El algoritmo desarrollado pretende facilitar el cálculo del asentamiento por consolidación, y se hará mención de los detalles del laboratorio más importantes, debido a que ya se han enlistado los pasos para la realización de dicho ensayo en la sección 1.7, y que debemos enfocarnos específicamente al cálculo de dicho asentamiento.

2.3.1 Ejemplo 1

Calcular el asentamiento por consolidación que provocará la construcción de una cimentación aislada rectangular de concreto reforzado. La arcilla fue extraída de un lugar donde no han actuado presiones verticales efectivas mayores que las existentes en la actualidad. El perfil estratigráfico del suelo se muestra en la Figura 19:

Figura 19. Características del lugar para el ejemplo 1



Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones de la cimentación serán:

- Base de 1 metro
- Longitud de 3 metros

Paso 1:

- Obtener una muestra inalterada de la arcilla, la cual debe ser parafinada para conservar las propiedades que posee en el campo.

Figura 20. Fotografía de la muestra inalterada de arcilla del ejemplo 1



Fuente: Tomada por el autor.

Paso 2:

- Retirar la parafina de la muestra inalterada y con cuidado tallar un trozo de la misma del tamaño del anillo de consolidación (el cual tiene un diámetro de 6.35 centímetros), con los instrumentos adecuados para que la muestra quede totalmente confinada. El material sobrante se utilizará para calcular la gravedad específica de la muestra.

Figura 21. Fotografía del anillo de consolidación con la muestra tallada



Fuente: Tomada por el autor.

Paso 3:

- Se pesa el anillo con la muestra ya tallada, y este dato se anota como peso bruto húmedo inicial de la pastilla: PBH = 182.3 gramos

Paso 4:

- Se coloca el anillo en la cazuela del consolidómetro y se procede a realizar el ensayo según los pasos descritos en la sección 1.7.5 y 1.7.6

Figura 22. Fotografía de la cazuela del consolidómetro



Fuente: Tomada por el autor.

Paso 5:

- Se procede a construir las curvas de consolidación únicamente para las presiones que presentan deformaciones considerables en la muestra, con la finalidad de obtener la lectura corregida al 100% de consolidación. Los pasos para la elaboración de las curvas de consolidación son:
 1. Anotar las lecturas del deformímetro para cada lapso de tiempo.
 2. En el eje de las lecturas del deformímetro en escala natural, se ubican las lecturas del tomadas anteriormente para cada lapso de tiempo, teniendo cuidado de que las mismas sean colocadas de manera simétrica.
 3. Graficar cada punto. En el eje de las abscisas graficar los valores de los tiempos transcurridos en escala logarítmica y en el eje de las ordenadas las correspondientes lecturas del deformímetro, en escala natural.
 4. Graficar la curva procurando que la misma toque todos los puntos o cumpla con una tendencia curvilínea.
 5. Hacer una recta tangente a la curva. La recta tangente debe intersectarse en ambos ejes.
 6. Medir la distancia en el eje de los tiempos, desde el origen a la intersección de la recta tangente a la curva.
 7. Multiplicar la distancia anteriormente medida por un factor de 1.15
 8. El resultado de dicha multiplicación se mide desde el origen (en el eje de los tiempos) y se grafica.
 9. Graficar una recta desde el punto ubicado con anterioridad, hasta el punto donde la recta tangente a la curva se intersecta con el eje de las lecturas del deformímetro.
 10. El punto donde se intersecta la recta graficada anteriormente, con la curva, es la lectura al 90% (Lect 90%).
 11. Prolongar una recta desde el punto de la lectura al 90%, al eje de los tiempos, para obtener el tiempo al 90% (T 90%).

12. Restar el valor de la lectura al 90% calculada con anterioridad, al valor del punto donde la recta tangente a la curva se intersecta con el eje de las lecturas del deformímetro (L_0).
13. El resultado anterior, se multiplica por un factor de 10/9.
14. Finalmente al resultado anteriormente calculado se le adiciona el valor del punto donde la recta tangente a la curva se intersecta con el eje de las lecturas del deformímetro (L_0), y el resultado de la suma es la lectura ya corregida al 100% de consolidación (Lect 100%).

NOTA: Por lo sencillo y repetitivo de este procedimiento, únicamente se elaborará la curva de consolidación para una presión aleatoria. Para las demás presiones se presentarán las lecturas ya corregidas.

- Los datos tomados durante el ensayo, para construir la curva de consolidación para la presión de 1.9 Kg/cm², se muestran en la Tabla I.

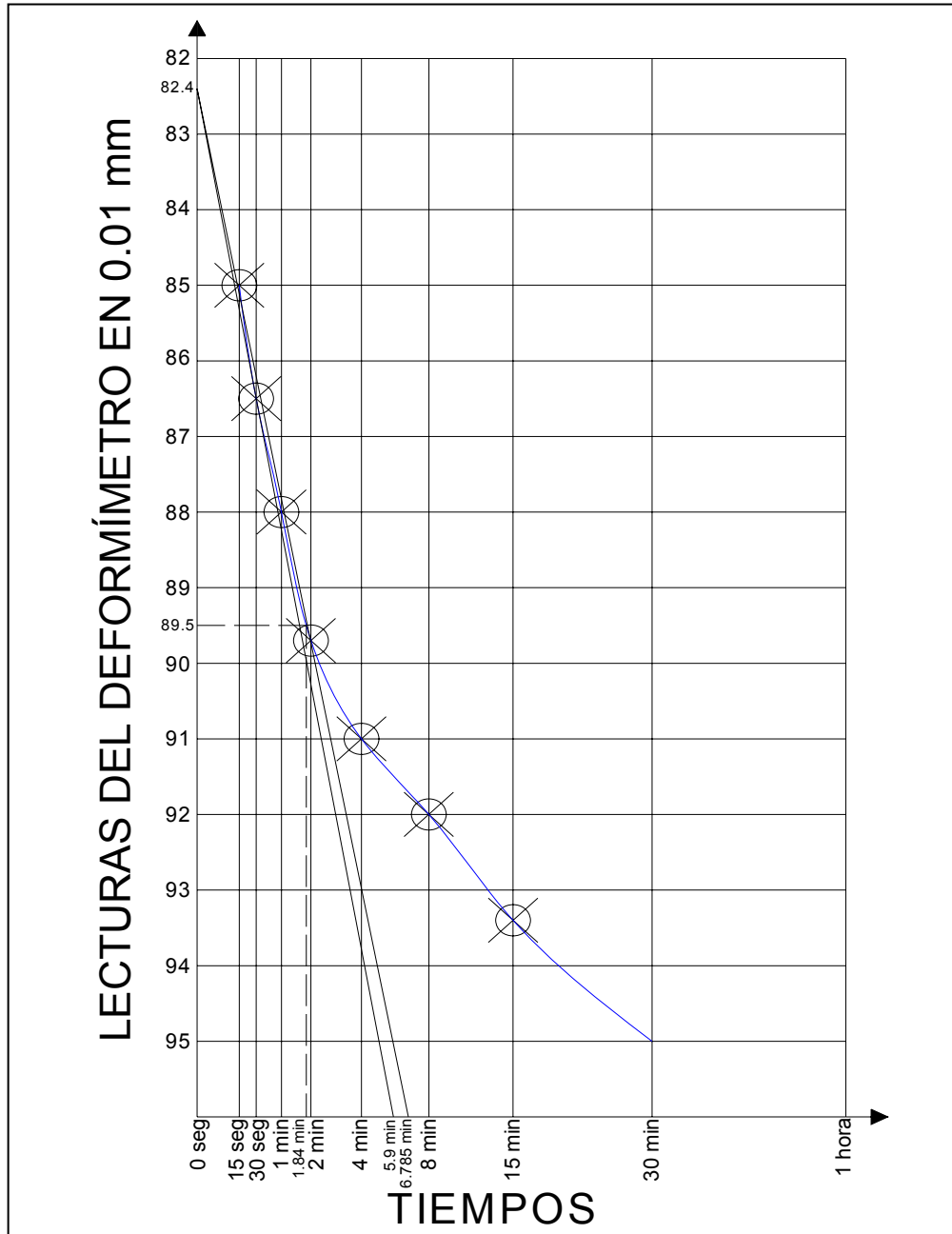
Tabla I. Lecturas del deformímetro para presión de 1.9 Kg/cm², ejemplo 1

Tiempo	Lectura del deformímetro
15 Segundos	85.0 x 10 ⁻² mm
30 Segundos	86.5 x 10 ⁻² mm
1 Minuto	88.0 x 10 ⁻² mm
2 Minutos	89.7 x 10 ⁻² mm
4 Minutos	91.0 x 10 ⁻² mm
8 Minutos	92.0 x 10 ⁻² mm
15 Minutos	93.4 x 10 ⁻² mm

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

- La curva de consolidación para la presión de 1.9 Kg/cm² se muestra en la Figura 23:

Figura 23. Curva de consolidación para presión de 1.9 Kg/cm², ejemplo 1



Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

- Se procede a calcular la corrección de la lectura:
 1. Medir la distancia del origen a la intersección de la recta tangente a la curva en el eje de los tiempos y ese dato se multiplica por 1.15:

$$5.9 \text{ minutos} \times 1.15 = 6.785 \text{ minutos}$$
 2. El punto donde la recta tangente a la curva se intersecta con el eje de las lecturas del deformímetro es:

$$L_o = 82.4 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
 3. Localizar el punto de 6.785 minutos en el eje de los tiempos, y graficar la recta que parte de ese punto en el eje de los tiempos, a $82.4 \times 10^{-2} \text{ mm}$ en el eje de las lecturas. Ubicar el punto donde intersecta la recta con la curva de consolidación, y este valor es la lectura al 90% de consolidación:

$$\text{Lect } 90\% = 89.5 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
 4. Prologando una línea al eje de los tiempos, el tiempo al 90% de consolidación es:

$$T \text{ } 90\% = 1.84 \text{ minutos}$$
 5. Para calcular la lectura al 100% de consolidación primero se resta el valor de L_o a la lectura al 90% de consolidación:

$$89.5 \times 10^{-2} \text{ mm} - 82.4 \times 10^{-2} \text{ mm} = 7.10 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
 6. Se multiplica este resultado por 10/9:

$$7.10 \times 10^{-2} \text{ mm} \times (10/9) = 7.89 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
 7. Finalmente se suma el resultado anterior a $82.4 \times 10^{-2} \text{ mm}$, para obtener la lectura al 100% de consolidación:

$$\text{Lect } 100\% = 7.89 \times 10^{-2} \text{ mm} + 82.4 \times 10^{-2} \text{ mm} = 90.29 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
- Luego de construir todas las curvas de consolidación, los datos corregidos se presentan en la Tabla II:

Tabla II. Lecturas corregidas de las curvas de consolidación, ejemplo 1

Presión	Lectura Corregida
0.1 Kg/cm ²	6.00 x 10 ⁻² mm
0.3 Kg/cm ²	25.00 x 10 ⁻² mm
0.7 Kg/cm ²	42.00 x 10 ⁻² mm
1.1 Kg/cm ²	64.72 x 10 ⁻² mm
1.9 Kg/cm ²	90.29 x 10 ⁻² mm
3.5 Kg/cm ²	166.10 x 10 ⁻² mm
6.7 Kg/cm ²	279.00 x 10 ⁻² mm
13.1 Kg/cm ²	421.56 x 10 ⁻² mm

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

Paso 6:

- Después de elaborar las curvas de consolidación y corregido las lecturas, se retira la cazuela del consolidómetro y se saca el anillo, poniéndolo a secar en el horno por lo menos 24 horas. Luego se pesa el conjunto, siendo éste el peso bruto seco, el cual es PBS = 136 gramos.
- Del paso 3 conocemos el peso bruto húmedo, que es PBH = 182.3 gramos. Para encontrar el peso neto húmedo (PNH), simplemente se resta el peso bruto húmedo menos el peso del anillo, que es de 63.8 gramos, lo que da un resultado de PNH = 118.5 gramos.
- Se calcula de igual forma el peso neto seco (PNS), restando el peso bruto seco al peso del anillo. El resultado es PNS = 72.2 gramos.
- Se procede a determinar la gravedad específica de la arcilla, según la norma ASTM D854 y AASHTO T-100.
- Para la arcilla del ejemplo 1, los datos tabulados del cálculo de la gravedad específica se presentan en la Tabla III:

Tabla III. Cálculo de la gravedad específica de la arcilla del ejemplo 1

Identificación del matraz	A	B
Capacidad nominal	500 cc	500 cc
Peso matraz limpio y seco = W_m	180 gr	170.8 gr
Peso matraz + suelo seco = W_{ms}	251.4 gr	244.2 gr
Peso suelo seco = W_s	71.4 gr	73.4 gr
Peso matraz + suelo + agua = W_{msw}	720.7 gr	712.6 gr
Peso matraz + agua = W_{mw}	680 gr	670.8 gr
$GS = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{msw}}$	2.326	2.323
Promedio	2.325	

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

- Se procede entonces a calcular los pesos específicos y alturas necesarias para calcular la relación de vacíos y así poder elaborar la curva de compresibilidad:

$$\gamma = \frac{PNH}{80.39} = \frac{118.5}{80.39} = 1.47 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_D = \frac{PNS}{80.39} = \frac{72.2}{80.39} = 0.90 \text{ gr/cm}^3$$

$$h_s = \frac{\gamma_D * h_o}{GS * \gamma_w} = \frac{(0.90)(2.54)}{(2.325)(1)} = 0.98 \text{ cm} = 9.8 \text{ mm}$$

- Finalmente, los datos para realizar la gráfica de compresibilidad están tabulados en la Tabla IV:

Tabla IV. Datos finales para elaborar la curva de compresibilidad del ejemplo 1

Presión (Kg/cm ²)	<i>Lectura</i> (10 ⁻² mm)	Deformación dh	Espesor <i>h</i> (mm)	<i>e</i>	Deformación %
0.1	6.00	0.06	25.34	1.5857	0.24
0.3	25.00	0.25	25.15	1.5663	0.98
0.7	42.00	0.42	24.98	1.5490	1.65
1.1	64.72	0.6472	24.7528	1.5258	2.55
1.9	90.29	0.9029	24.4971	1.4997	3.55
3.5	166.10	1.6610	23.7390	1.4223	6.54
6.7	279.00	2.7900	22.6100	1.3071	10.98
13.1	421.56	4.2156	21.1840	1.1612	16.60

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

Donde:

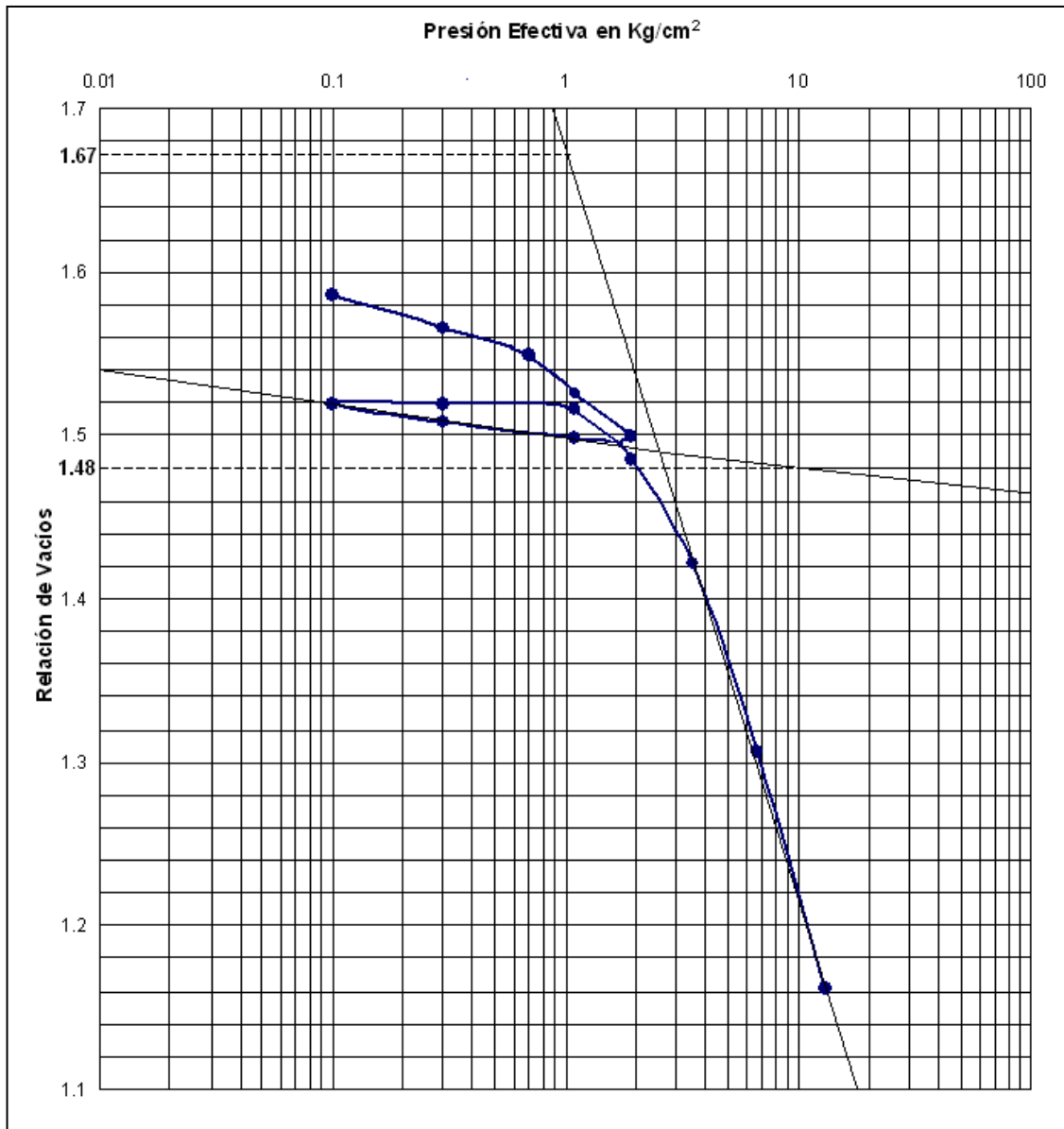
- ✓ Deformación (dh) = *Lectura* x 0.01
- ✓ Espesor (*h*) = 25.4 – Deformación (dh)
- ✓ Relación de vacíos (*e*) = $e = \frac{h}{h_s} - 1$
- ✓ Deformación % = $\frac{Lectura}{25.4}$

Paso 7:

- Se construye entonces la curva de compresibilidad. En el eje de las abscisas se grafican los valores de la presión efectiva en escala logarítmica y en el eje de las ordenadas la relación de vacíos en escala natural.

- La curva de compresibilidad para el ejemplo 1, se muestra a continuación en la Figura 24.

Figura 24. Curva de compresibilidad para el ejemplo 1



Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

Paso 8:

- Observando los valores de la relación de vacíos interpolados en la gráfica de compresibilidad, se calcula el índice de compresión (C_c) y el índice de expansibilidad (C_s):

$$C_s = \frac{|(e_{10}) - (e_{0.1})|}{\log(10) - \log(0.1)} = \frac{|1.48 - 1.5857|}{2} = 0.053$$

$$C_c = \frac{|(e_{13.1}) - (e_1)|}{\log(13.1) - \log(1)} = \frac{|1.1612 - 1.67|}{1.1173} = 0.46$$

- Se procede también a calcular el coeficiente de consolidación C_v con la expresión:

$$C_v = \frac{1.36774 \times 10^{-4}}{T_{90\%}}$$

Donde: $T_{90\%}$ = Tiempo al 90% de consolidación, obtenido en la corrección de la lectura por medio de la curva de consolidación, expresado en segundos.

NOTA: Por lo repetitivo y sencillo del procedimiento, se realizará el cálculo únicamente para la presión de 1.9 Kg/cm², presión que se tomó como ejemplo para calcular la corrección de lecturas por medio de la curva de consolidación. Los valores del coeficiente de consolidación C_v , para las diferentes presiones, se muestran en la Tabla V:

$$C_v = \frac{1.36774 \times 10^{-4}}{(1.84)(60)} = 1.24 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{seg}$$

Tabla V. Coeficientes de consolidación para el ejemplo 1

C_v (m ² /seg)							
0.1 (Kg/cm ²)	0.3 (Kg/cm ²)	0.7 (Kg/cm ²)	1.1 (Kg/cm ²)	1.9 (Kg/cm ²)	3.5 (Kg/cm ²)	6.7 (Kg/cm ²)	13.1 (Kg/cm ²)
2.85×10^{-7}	2.85×10^{-7}	2.85×10^{-7}	1.87×10^{-7}	1.24×10^{-6}	1.14×10^{-6}	1.30×10^{-6}	1.30×10^{-6}

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

- Los datos del ensayo que se utilizarán para el cálculo de asentamiento por consolidación son:

$$\gamma = 1.47 \text{ gr/cm}^3 \approx 1470 \text{ Kg/m}^3$$

$$e_o = 1.5857 \text{ (adimensional)}$$

$$C_s = 0.053 \text{ (adimensional)}$$

$$C_c = 0.46 \text{ (adimensional)}$$

Paso 9:

- Se procede entonces a calcular el asentamiento por consolidación, primero analizando el perfil estratigráfico del suelo, y considerando que la arcilla es normalmente consolidada, por lo tanto se utiliza la fórmula:

$$S_c = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_v + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_v}$$

Donde:

σ'_v = presión efectiva promedio sobre el estrato de arcilla antes de la construcción de la cimentación.

$\Delta \sigma'_v$ = incremento promedio de la presión sobre el estrato de arcilla causada por la construcción de la cimentación.

H_c = espesor de la capa de arcilla

1. Primero se calcula la presión efectiva promedio sobre el estrato de arcilla antes de la construcción de la cimentación σ'_{v}

$$\sigma'_{v} = (h_1)(\gamma_1) + (h_2)(\gamma_2 - \gamma_w) + (h_3)(\gamma_3 - \gamma_w)$$

$$\sigma'_{v} = (2.5)(1500) + (0.5)(1600 - 1000) + (1.25)(1470 - 1000)$$

$$\sigma'_{v} = 4637.5 \text{ Kg/m}^2$$

2. Luego se calcula el incremento de presión utilizando la fórmula:

$$\Delta\sigma'_{v} = \frac{1}{6}(\Delta\sigma'_{vt} + 4\Delta\sigma'_{vm} + \Delta\sigma'_{vb})$$

- Si las dimensiones de la cimentación son: B = 1 metro y L = 3 metros, se procede a elaborar la Tabla VI, para calcular los incrementos de presión en la arcilla:

Tabla VI. Cálculo del incremento de presión del ejemplo 1

m_1	z (en metros)	n_1	I_C	$\Delta\sigma'_{v}$
3	2	4	0.241	$\Delta\sigma'_{vt} = 3374 \text{ Kg/m}^2$
3	$2 + 2.5/2 = 3.25$	6.5	≈ 0.115	$\Delta\sigma'_{vm} = 1610 \text{ Kg/m}^2$
3	$2 + 2.5 = 4.5$	9	0.064	$\Delta\sigma'_{vb} = 896 \text{ Kg/m}^2$

Fuente: Elaboración propia en base a datos del ejemplo 1.

Donde:

$$m_1 = \frac{L}{B}$$

$$n_1 = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

I_c = Valor que se busca en la Tabla VII, conociendo los valores de m_1 y n_1 .

$$\Delta\sigma'_v = q_0 I_c$$

$$q_0 = 14000 \text{ Kg/m}^2$$

Tabla VII. Variación de I_c con respecto de m_1 y n_1

n_1	m_1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.20	0.994	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
0.40	0.960	0.976	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977
0.60	0.892	0.932	0.936	0.936	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937
0.80	0.800	0.870	0.878	0.880	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881
1.00	0.701	0.800	0.814	0.817	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818
1.20	0.606	0.727	0.748	0.753	0.754	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
1.40	0.522	0.658	0.685	0.692	0.694	0.695	0.695	0.696	0.696	0.696
1.60	0.449	0.593	0.627	0.636	0.639	0.640	0.641	0.641	0.641	0.642
1.80	0.388	0.534	0.573	0.585	0.590	0.591	0.592	0.592	0.593	0.593
2.00	0.336	0.481	0.525	0.540	0.545	0.547	0.548	0.549	0.549	0.549
3.00	0.179	0.293	0.348	0.373	0.384	0.389	0.392	0.393	0.394	0.395
4.00	0.108	0.190	0.241	0.269	0.285	0.293	0.298	0.301	0.302	0.303
5.00	0.072	0.131	0.174	0.202	0.219	0.229	0.236	0.240	0.242	0.244
6.00	0.051	0.095	0.130	0.155	0.172	0.184	0.192	0.197	0.200	0.202
7.00	0.038	0.072	0.100	0.122	0.139	0.150	0.158	0.164	0.168	0.171
8.00	0.029	0.056	0.079	0.098	0.113	0.125	0.133	0.139	0.144	0.147
9.00	0.023	0.045	0.064	0.081	0.094	0.105	0.113	0.119	0.124	0.128
10.00	0.019	0.037	0.053	0.067	0.079	0.089	0.097	0.103	0.108	0.112

Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones** Pág. 227

- Finalmente, el incremento de presión se calcula como:

$$\Delta\sigma'_v = \frac{1}{6} [3374 + 4(1610) + 896]$$

$$\Delta\sigma'_v = 1785 \text{ Kg/m}^2$$

3. Procedemos entonces a calcular el asentamiento por consolidación, con los datos:

- $C_c = 0.46$
- $H_c = 2.5$ metros
- $e_0 = 1.5857$
- $\sigma'_{\nu} = 4637.5 \text{ Kg/m}^2$
- $\Delta\sigma'_v = 1785 \text{ Kg/m}^2$

$$S_C = \frac{(0.46)(2.5)}{(1+1.5857)} \log \frac{(4637.5+1785)}{4637.5}$$

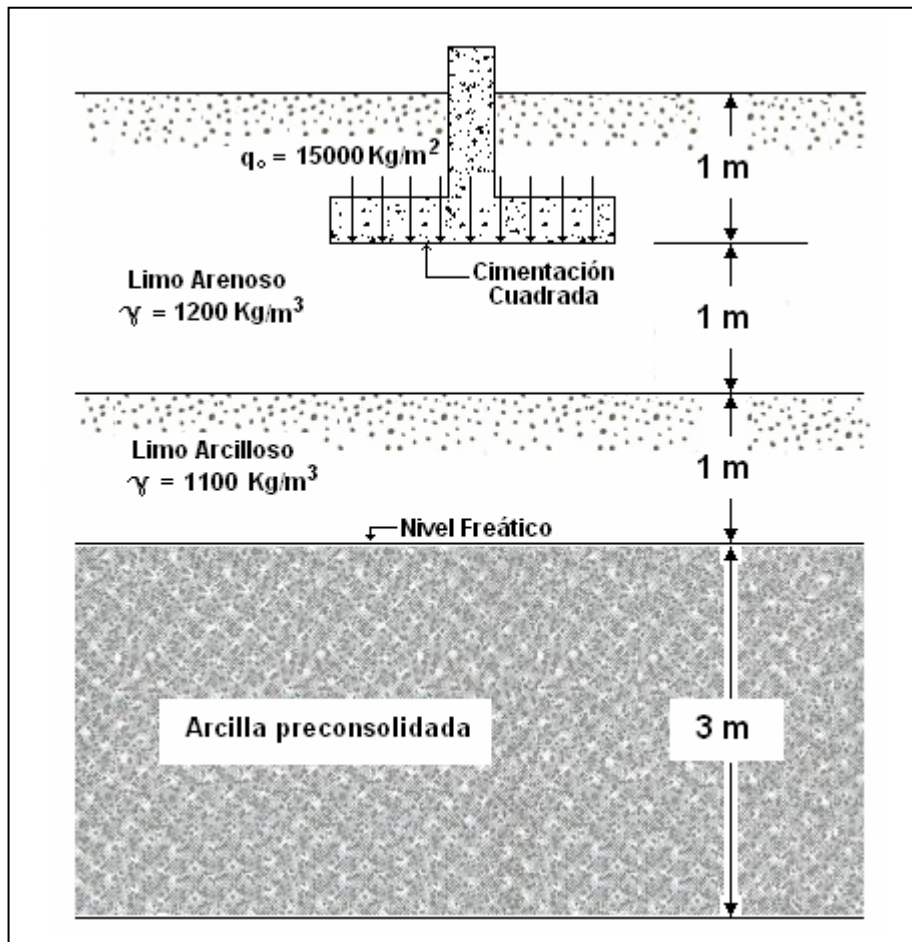
$$S_C = 0.06289 \text{ metros}$$

$$S_C = \mathbf{62.89 \text{ milímetros}}$$

2.3.2 Ejemplo 2

Calcular el asentamiento por consolidación que provocará la construcción de una cimentación aislada cuadrada, con base y longitud de 3 metros de concreto reforzado. La arcilla fue extraída de un lugar donde ya han actuado presiones verticales efectivas mayores que las existentes en la actualidad. El perfil estratigráfico del suelo se muestra en la Figura 25:

Figura 25. Características del lugar para el ejemplo 2



Fuente: Elaboración propia.

Paso 1:

- Obtener una muestra inalterada de la arcilla, la cual debe ser parafinada para conservar las propiedades que posee en el campo.

Figura 26. Fotografía de la muestra inalterada de arcilla del ejemplo 2



Fuente: Tomada por el autor.

Paso 2:

- Retirar la parafina de la muestra inalterada y con cuidado tallar un trozo de la misma del tamaño del anillo de consolidación (el cual tiene un diámetro de 6.35 centímetros), con los instrumentos adecuados para que la muestra quede totalmente confinada. El material sobrante se utilizará para calcular la gravedad específica de la muestra.

Paso 3:

- Se pesa el anillo con la muestra ya tallada, y este dato se anota como peso bruto húmedo inicial de la pastilla: PBH = 192.7 gramos

Paso 4:

- Se coloca el anillo en la cazuela del consolidómetro y se procede a realizar el ensayo según los pasos descritos en la sección 1.7.5 y 1.7.6

Paso 5:

- Se procede a construir las curvas de consolidación únicamente para las presiones que presentan deformaciones considerables en la muestra, con la finalidad de obtener la lectura corregida al 100% de consolidación.
- Los datos tomados durante el ensayo, para construir la curva de consolidación para la presión de 1.1 Kg/cm^2 , se presentan en la Tabla VIII.

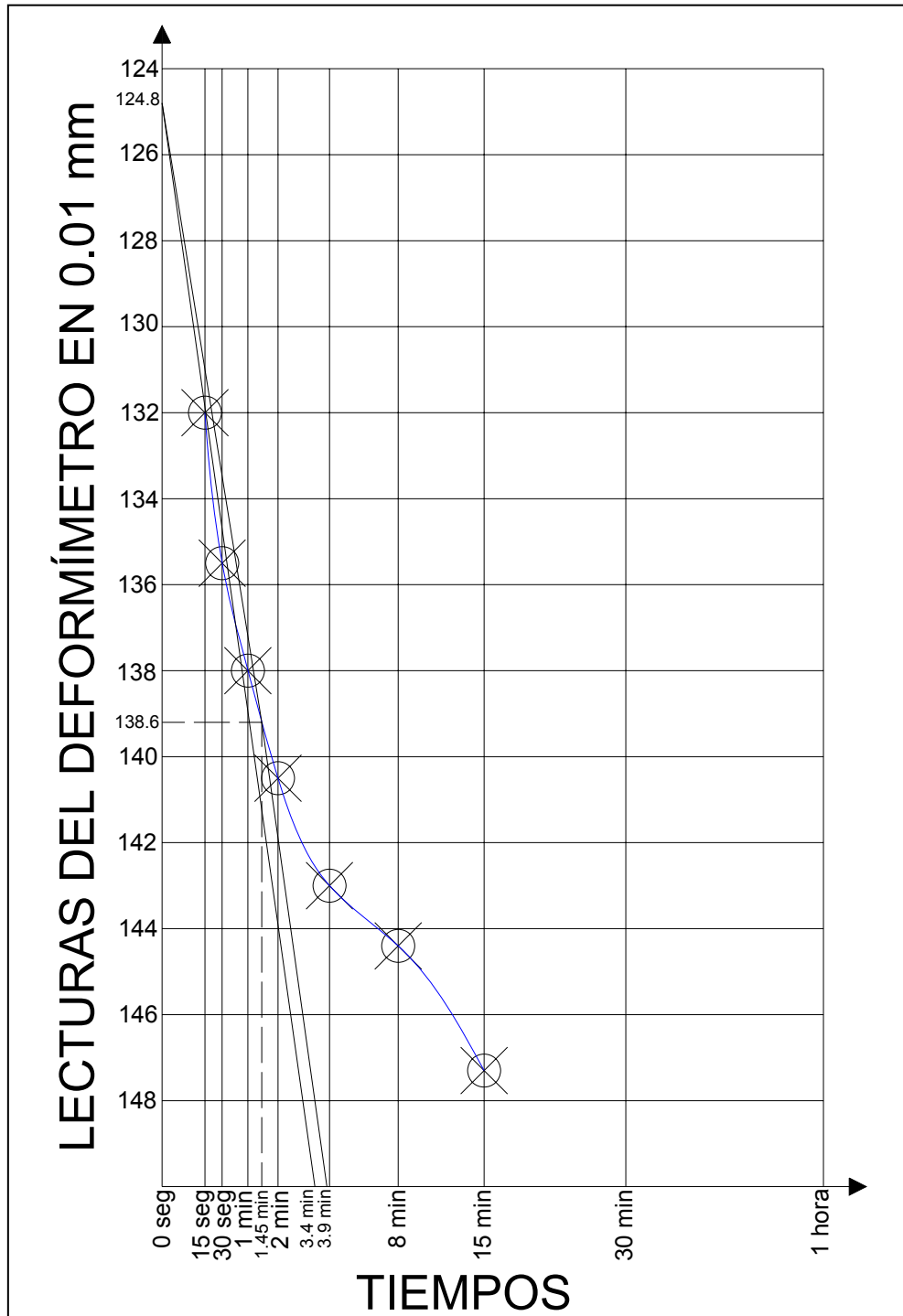
Tabla VIII. Lecturas del deformímetro para presión de 1.1 Kg/cm^2 , del ejemplo 2

Tiempo	Lectura del deformímetro
15 Segundos	$132.0 \times 10^{-2} \text{ mm}$
30 Segundos	$135.5 \times 10^{-2} \text{ mm}$
1 Minuto	$138.0 \times 10^{-2} \text{ mm}$
2 Minutos	$140.5 \times 10^{-2} \text{ mm}$
4 Minutos	$143.0 \times 10^{-2} \text{ mm}$
8 Minutos	$144.4 \times 10^{-2} \text{ mm}$
15 Minutos	$145.3 \times 10^{-2} \text{ mm}$

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

- La curva de consolidación para la presión de 1.1 Kg/cm^2 del ejemplo 2, se muestra en la Figura 27:

Figura 27. Curva de consolidación para presión de 1.1 Kg/cm², ejemplo 2



Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

- Se procede a calcular la corrección de la lectura:
 1. Medir la distancia del origen a la intersección de la recta tangente a la curva en el eje de los tiempos y ese dato se multiplica por 1.15:

$$3.4 \text{ minutos} \times 1.15 = 3.9 \text{ minutos}$$
 2. El punto donde la recta tangente a la curva se intersecta con el eje de las lecturas del deformímetro es:

$$L_o = 124.8 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
 3. Localizar el punto de 3.9 minutos en el eje de los tiempos, y graficar la recta que parte de ese punto en el eje de los tiempos, a 124.8×10^{-2} mm en el eje de las lecturas. Ubicar el punto donde intersecta la recta con la curva de consolidación, y este valor es la lectura al 90% de consolidación:

$$\text{Lect } 90\% = 138.6 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
 4. Prologando una línea al eje de los tiempos, el tiempo al 90% de consolidación es:

$$T \text{ } 90\% = 1.45 \text{ minutos}$$
 5. Para calcular la lectura al 100% de consolidación primero se resta el valor de L_o a la lectura al 90% de consolidación:

$$138.6 \times 10^{-2} \text{ mm} - 124.8 \times 10^{-2} \text{ mm} = 13.8 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
 6. Se multiplica este resultado por 10/9:

$$13.8 \times 10^{-2} \text{ mm} \times (10/9) = 15.33 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
 7. Finalmente se suma el resultado anterior a 124.8×10^{-2} mm, para obtener la lectura al 100% de consolidación:

$$\text{Lect } 100\% = 15.33 \times 10^{-2} \text{ mm} + 124.8 \times 10^{-2} \text{ mm} = 140.1 \times 10^{-2} \text{ mm}$$
- Luego de construir todas las curvas de consolidación, los datos corregidos se presentan en la Tabla IX:

Tabla IX. Lecturas corregidas de las curvas de consolidación, ejemplo 2

Presión	Lectura Corregida
0.1 Kg/cm ²	11.8 x 10 ⁻² mm
0.3 Kg/cm ²	50.4 x 10 ⁻² mm
0.7 Kg/cm ²	94.4 x 10 ⁻² mm
1.1 Kg/cm ²	140.1 x 10 ⁻² mm
1.9 Kg/cm ²	272.5 x 10 ⁻² mm
3.5 Kg/cm ²	353.6 x 10 ⁻² mm
6.7 Kg/cm ²	443.6 x 10 ⁻² mm

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

Paso 6:

- Después de elaborar las curvas de consolidación y corregido las lecturas, se retira la cazuela del consolidómetro y se saca el anillo, poniéndolo a secar en el horno por lo menos 24 horas. Luego se pesa el conjunto, siendo éste el peso bruto seco, el cual es PBS = 157.8 gramos.
- Del paso 3 conocemos el peso bruto húmedo, que es PBH = 192.7 gramos. Para encontrar el peso neto húmedo (PNH), simplemente se resta el peso bruto húmedo menos el peso del anillo, que es de 63.8 gramos, lo que da un resultado de PNH = 128.9 gramos.
- Se calcula de igual forma el peso neto seco (PNS), restando el peso bruto seco al peso del anillo. El resultado es PNS = 94.0 gramos.
- Se procede a determinar la gravedad específica de la arcilla, según la norma ASTM D854 y AASHTO T-100.
- Para la arcilla del ejemplo 2, los datos tabulados del cálculo de la gravedad específica se presentan en la Tabla X:

Tabla X. Cálculo de la gravedad específica de la arcilla del ejemplo 2

Identificación del matraz	A	B
Capacidad nominal	500 cc	500 cc
Peso matraz limpio y seco = W_m	180.3 gr	180.3 gr
Peso matraz + suelo seco = W_{ms}	250.2 gr	250.2 gr
Peso suelo seco = W_s	69.9 gr	69.9 gr
Peso matraz + suelo + agua = W_{msw}	721.3 gr	720.9 gr
Peso matraz + agua = W_{mw}	677.3 gr	677.6 gr
$GS = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{msw}}$	2.699	2.628
Promedio	2.663	

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

- Se procede entonces a calcular los pesos específicos y alturas necesarias para calcular la relación de vacíos y así poder elaborar la curva de compresibilidad:

$$\gamma = \frac{PNH}{80.39} = \frac{128.9}{80.39} = 1.60 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_D = \frac{PNS}{80.39} = \frac{94.0}{80.39} = 1.17 \text{ gr/cm}^3$$

$$h_s = \frac{\gamma_D * h_o}{GS * \gamma_w} = \frac{(1.17)(2.54)}{(2.663)(1)} = 1.12 \text{ cm} = 11.2 \text{ mm}$$

- Finalmente, los datos para realizar la gráfica de compresibilidad están tabulados en la Tabla XI:

Tabla XI. Datos finales para elaborar la curva de compresibilidad del ejemplo 2

Presión (Kg/cm ²)	<i>Lectura</i> (10 ⁻² mm)	Deformación dh	Espesor <i>h</i> (mm)	<i>e</i>	Deformación %
0.1	11.8	0.118	25.282	1.257	0.46
0.3	50.4	0.504	24.896	1.223	1.98
0.7	94.4	0.944	24.456	1.184	3.72
1.1	140.1	1.401	23.999	1.143	5.52
1.9	272.5	2.725	22.675	1.025	10.73
3.5	353.6	3.536	21.864	0.952	13.92
6.7	443.6	4.436	20.964	0.872	17.46

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

Donde:

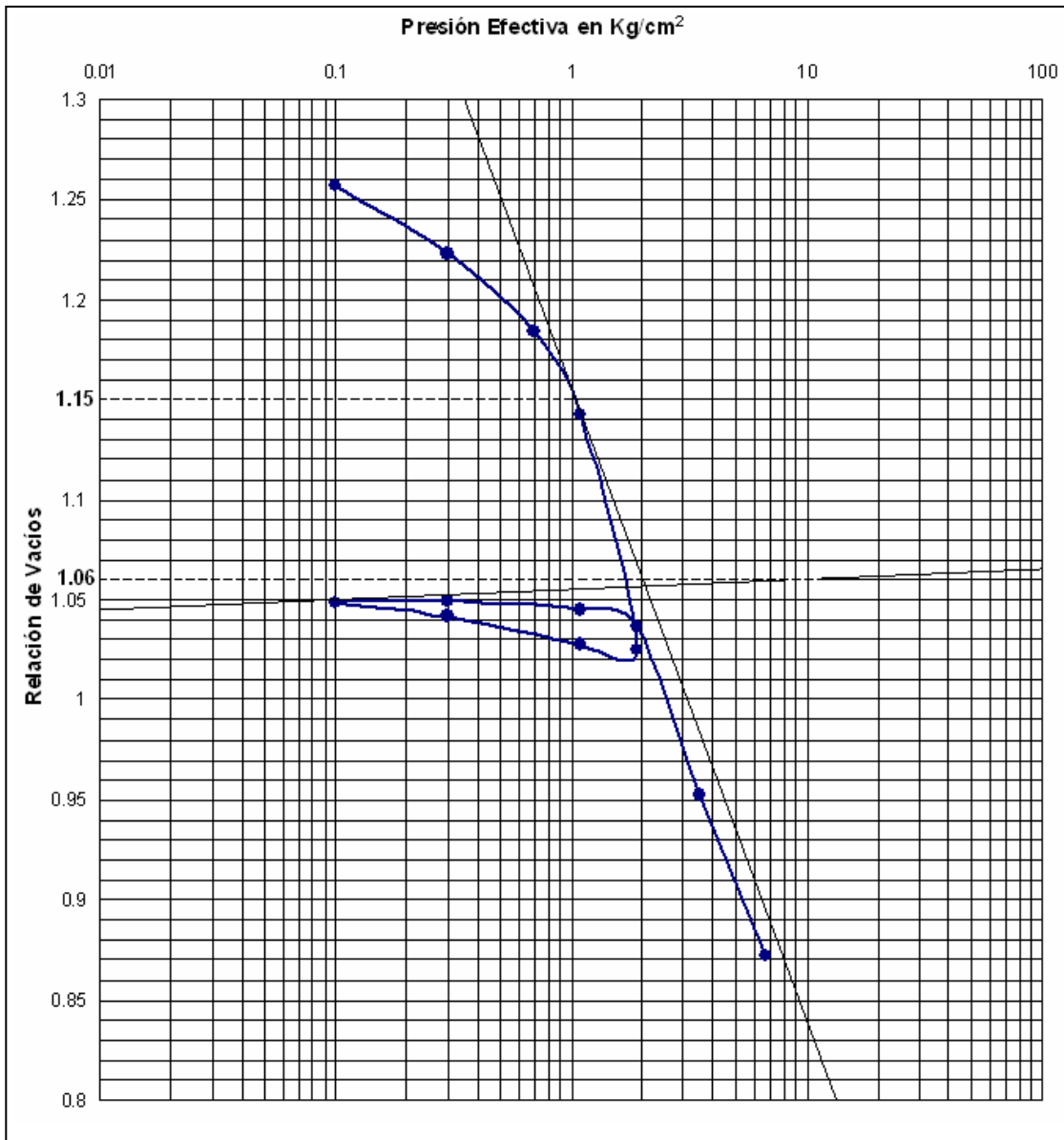
- ✓ Deformación (dh) = *Lectura* x 0.01
- ✓ Espesor (*h*) = 25.4 – Deformación (dh)
- ✓ Relación de vacíos (*e*) = $e = \frac{h}{h_s} - 1$
- ✓ Deformación % = $\frac{Lectura}{25.4}$

Paso 7:

- Se construye entonces la curva de compresibilidad. En el eje de las abscisas se grafican los valores de la presión efectiva en escala logarítmica y en el eje de las ordenadas la relación de vacíos en escala natural.

- La curva de compresibilidad para el ejemplo 2, se muestra a continuación en la Figura 28.

Figura 28. Curva de compresibilidad para el ejemplo 2



Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

Paso 8:

- Observando los valores de la relación de vacíos interpolados en la gráfica de compresibilidad, se calcula el índice de compresión (C_c) y el índice de expansibilidad (C_s):

$$C_s = \frac{|(Lectura_{10}) - (Lectura_{0.1})|}{\log(10) - \log(0.1)} = \frac{|1.06 - 1.257|}{2} = 0.09$$

$$C_c = \frac{|(Lectura_{6.7}) - (Lectura_1)|}{\log(6.7) - \log(1)} = \frac{|0.872 - 1.15|}{0.8261} = 0.34$$

- Se procede también a calcular el coeficiente de consolidación C_v con la expresión:

$$C_v = \frac{1.36774 \times 10^{-4}}{T_{90\%}}$$

Donde: $T_{90\%}$ = Tiempo al 90% de consolidación, obtenido en la corrección de la lectura por medio de la curva de consolidación, expresado en segundos.

NOTA: Por lo repetitivo y sencillo del procedimiento, se realizará el cálculo únicamente para la presión de 1.1 Kg/cm², presión que se tomó como ejemplo para calcular la corrección de lecturas por medio de la curva de consolidación. Los valores del coeficiente de consolidación C_v , para las diferentes presiones, se muestran en la Tabla XII:

$$C_v = \frac{1.36774 \times 10^{-4}}{(1.45)(60)} = 1.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{seg}$$

Tabla XII. Coeficientes de consolidación para el ejemplo 2

C_v (m ² /seg)						
0.1 (Kg/cm ²)	0.3 (Kg/cm ²)	0.7 (Kg/cm ²)	1.1 (Kg/cm ²)	1.9 (Kg/cm ²)	3.5 (Kg/cm ²)	6.7 (Kg/cm ²)
5.70×10^{-7}	1.14×10^{-6}	1.34×10^{-6}	1.57×10^{-6}	8.14×10^{-7}	4.56×10^{-7}	5.07×10^{-7}

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del ensayo.

- Los datos del ensayo que se utilizarán para el cálculo de asentamiento por consolidación son:

$$\gamma = 1.60 \text{ gr/cm}^3 \approx 1600 \text{ Kg/m}^3$$

$$\sigma'_p = 0.60 \text{ Kg/cm}^2 \approx 6000 \text{ Kg/m}^2$$

$$e_o = 1.257 \text{ (adimensional)}$$

$$C_s = 0.09 \text{ (adimensional)}$$

$$C_c = 0.34 \text{ (adimensional)}$$

Paso 9:

- Se procede entonces a calcular el asentamiento por consolidación, primero analizando el perfil estratigráfico del suelo, y considerando que la arcilla es preconsolidada, por lo tanto se utiliza la fórmula:

$$S_c = \frac{C_s H_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_v + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_v}$$

Para arcillas preconsolidadas que cumplan con $\sigma'_{vf} < \sigma'_p$

Donde:

$$\sigma'_{vf} = \sigma'_v + \Delta \sigma'_v = \text{presión final actuante en el estrato}$$

σ'_p = presión de consolidación

σ'_v = presión efectiva promedio sobre el estrato de arcilla antes de la construcción de la cimentación

$\Delta\sigma'_v$ = incremento promedio de la presión sobre el estrato de arcilla causada por la construcción de la cimentación

e_0 = relación de vacíos inicial del estrato de arcilla

C_s = índice de expansibilidad

H_c = espesor de la capa de arcilla

1. Primero se calcula la presión efectiva promedio sobre el estrato de arcilla antes de la construcción de la cimentación σ'_v

$$\sigma'_v = (h_1)(\gamma_1) + (h_2)(\gamma_2) + (h_3)(\gamma_3 - \gamma_w)$$

$$\sigma'_v = (2)(1200) + (1)(1100) + (1.5)(1600 - 1000)$$

$$\sigma'_v = 4400 \text{ Kg/m}^2$$

2. Luego se calcula el incremento de presión utilizando la fórmula:

$$\Delta\sigma'_v = \frac{1}{6}(\Delta\sigma'_{vt} + 4\Delta\sigma'_{vm} + \Delta\sigma'_{vb})$$

- Si las dimensiones de la cimentación son: B = 3 metro y L = 3 metros, se procede a elaborar la Tabla XIII, para calcular los incrementos de presión en la arcilla:

Tabla XIII. Cálculo del incremento de presión del ejemplo 2

m_l	z (en metros)	n_l	I_C	$\Delta\sigma'_v$
1	$2 + 1 = 3$	3	0.179	$\Delta\sigma'_{vt} = 2685 \text{ Kg/m}^2$
1	$3 + 3/2 = 4.5$	4.5	≈ 0.090	$\Delta\sigma'_{vm} = 1350 \text{ Kg/m}^2$
1	$2 + 1 + 3 = 6$	6	0.051	$\Delta\sigma'_{vb} = 765 \text{ Kg/m}^2$

Fuente: Elaboración propia en base a datos del ejemplo 2.

Donde:

$$m_l = \frac{L}{B}$$

$$n_l = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

I_C = Valor que se busca en la Tabla VII, conociendo los valores de m_l y n_l .

$$\Delta\sigma'_v = q_0 I_C$$

$$q_0 = 15000 \text{ Kg/m}^2$$

– Finalmente, el incremento de presión se calcula como:

$$\Delta\sigma'_v = \frac{1}{6} [2685 + 4(1350) + 765]$$

$$\Delta\sigma'_v = 1475 \text{ Kg/m}^2$$

3. Se calcula la presión final actuante en el estrato:

$$\sigma'_{vf} = 4400 + 1475$$

$$\sigma'_{vf} = 5875 \text{ Kg/m}^2$$

4. Chequear si se cumple la condición:

$$\sigma'_{vf} < \sigma'_p$$
$$5875 \text{ Kg/m}^2 < 6000 \text{ Kg/m}^2$$

5. Como cumple la condición de preconsolidación, se procede entonces a calcular el asentamiento por consolidación, con los datos:

- $C_s = 0.09$
- $e_o = 1.257$
- $H_c = 3$ metros
- $\sigma'_{v'} = 4400 \text{ Kg/m}^2$
- $\Delta\sigma'_{v'} = 1475 \text{ Kg/m}^2$

$$S_c = \frac{(0.09)(3)}{(1+1.257)} \log \frac{(4400+1475)}{4400}$$

$$S_c = 0.01502 \text{ metros}$$

$$S_c = 15.02 \text{ milímetros}$$

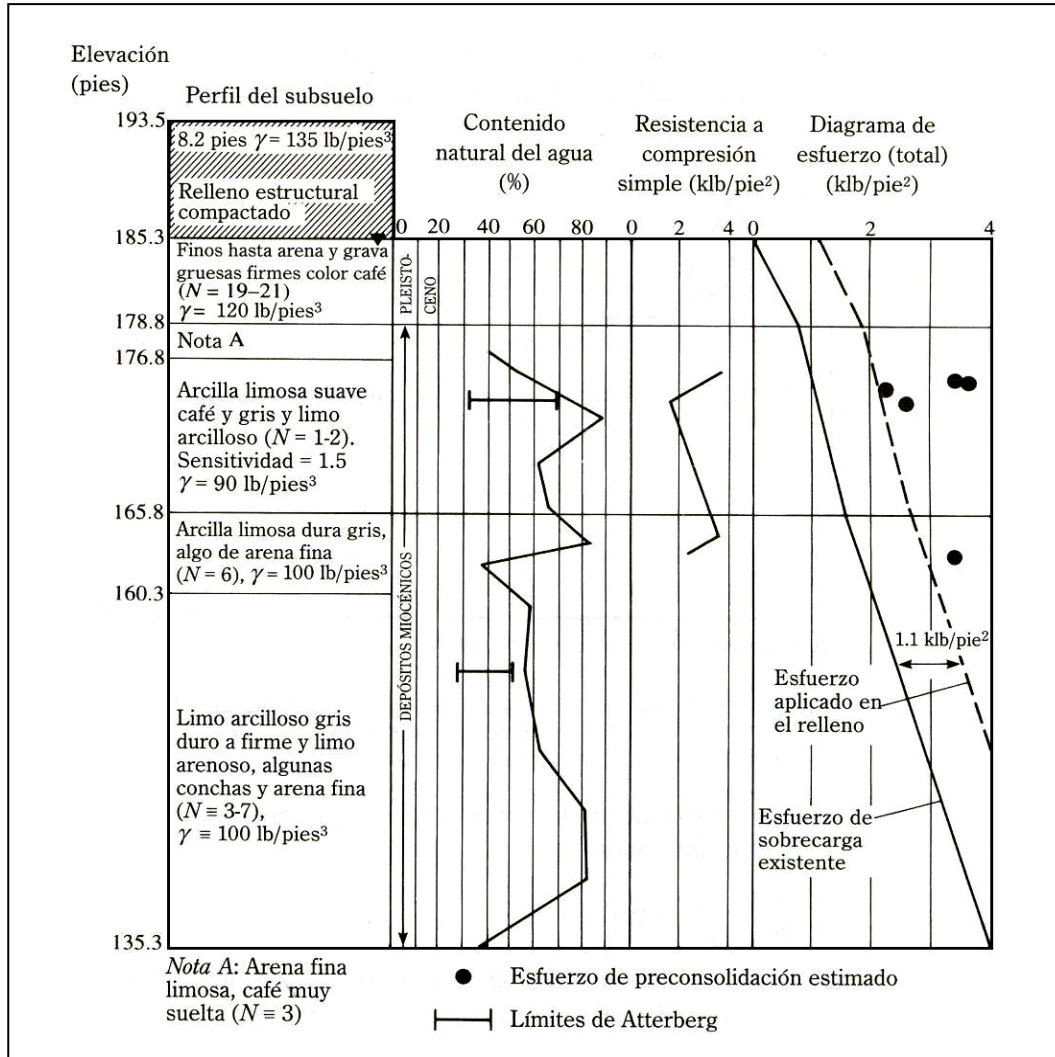
2.4 Comentarios generales del asentamiento por consolidación, un caso histórico

Al predecir el asentamiento por consolidación y su rapidez en condiciones de campo reales, el ingeniero tiene que hacer varias suposiciones simplificadoras. Éstas se refieren al índice de compresión, al coeficiente de consolidación, a la presión de preconsolidación, a las condiciones de drenaje y al espesor del estrato de arcilla. La estratificación del suelo no es siempre uniforme y con propiedades ideales; por consiguiente, el comportamiento en el campo se desvía de lo predicho, requiriéndose entonces ajustes durante la construcción. El siguiente caso de consolidación, ilustra esta realidad ⁽⁴⁾.

La Figura 29 muestra las condiciones del subsuelo para la construcción de un edificio escolar. Suelos de arena y grava del pleistoceno superior están soportados por depósitos de arena limosa fina muy suelta, de arcilla limosa suave y de limo arcilloso. Los estratos más suaves están sobre varias capas de arcilla limosa rígida a firme, limo arcilloso y limo arenoso hasta una profundidad de 50 pies.

Antes de que comenzara la construcción del edificio, un terraplén compactado con espesor de 8 a 10 pies fue colocado sobre la superficie del terreno. Este terraplén inició el asentamiento por consolidación en la arcilla limosa suave y el limo arcilloso.

Figura 29. Condiciones del subsuelo para la construcción de un edificio escolar.



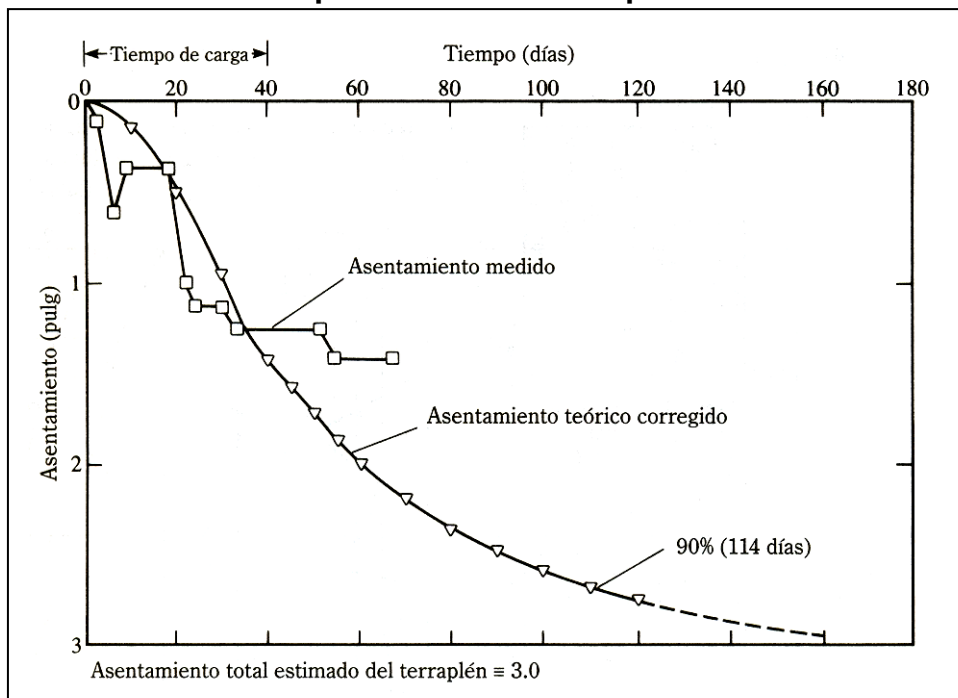
Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones** Pág. 257

Para predecir la velocidad de asentamiento en base a los resultados de pruebas de laboratorio, los ingenieros hicieron las siguientes aproximaciones:

- La presión de preconsolidación fue de 1600 a 2800 lb/pies² en exceso de la presión existente de sobrecarga.
- El índice de expansibilidad, C_s , fue de entre 0.01 y 0.03
- Para los estratos más compresibles, el coeficiente de consolidación, C_v , fue aproximadamente de 0.36 pie²/día y para los estratos más rígidos de suelo fue de 3.1 pie²/día.

El asentamiento total por consolidación fue estimado aproximadamente igual a 3 pulgadas. Se esperó que bajo condiciones de drenaje doble, el 90% del asentamiento ocurriese en 114 días.

Figura 30. Comparación del asentamiento por consolidación medido y predicho con el tiempo



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones** Pág. 258

La Figura 30 muestra una comparación de los asentamientos medidos y predichos con el tiempo, indicando que:

- a. La relación del asentamiento por consolidación observado entre el asentamiento por consolidación estimado, es aproximadamente:

$$\frac{S_{C(\text{observado})}}{S_{C(\text{estimado})}} \approx 0.47$$

- b. 90% del asentamiento ocurrió en aproximadamente 70 días; por consiguiente:

$$\frac{t_{90(\text{observado})}}{t_{90(\text{estimado})}} \approx 0.58$$

Se cree que el relativamente rápido asentamiento en el campo se debe a la presencia de un estrato de arena fina dentro de depósitos miocénicos.

3. CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS POR OTROS MÉTODOS RELACIONADOS

Como complemento a los capítulos anteriores, en el capítulo tres se analizan las diferentes formas de cálculo de asentamientos por otros métodos relacionados al de la consolidación. Se describe el asentamiento elástico basado en la teoría de la elasticidad, el asentamiento elástico de cimentaciones sobre arcillas saturadas, el uso del factor de influencia de la deformación unitaria en asentamientos en suelos arenosos y por último, el rango de los parámetros del material para calcular asentamientos elásticos

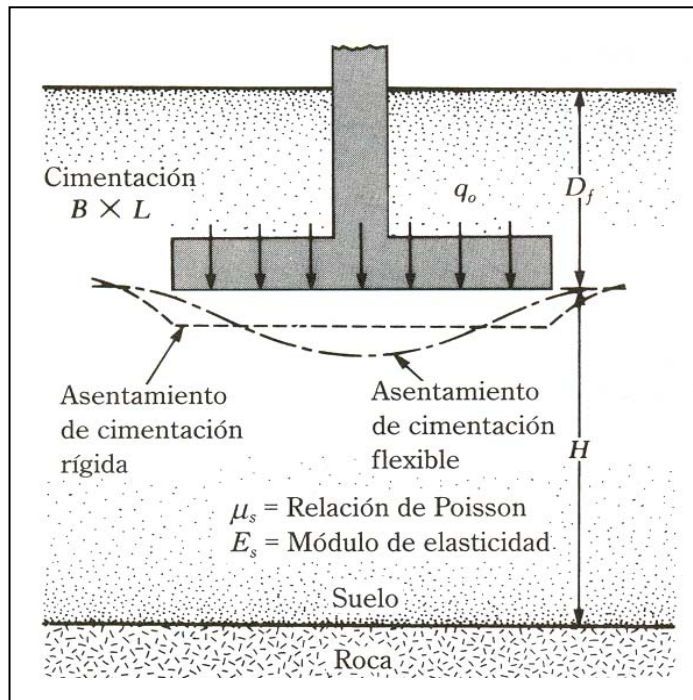
3.1 Asentamiento elástico basado en la teoría de la elasticidad

El asentamiento elástico de una cimentación superficial se estima usando la teoría de la elasticidad. Teóricamente, y luego de analizar la Figura 31, si la profundidad de la cimentación $Df = 0$, $H = \infty$, y la cimentación es perfectamente flexible, el asentamiento se expresa como:

$$S_e = \frac{Bq_o}{E_s} (1 - \mu_s^2) \frac{\alpha}{2} \quad (\text{Esquina de la cimentación flexible})$$

$$S_e = \frac{Bq_o}{E_s} (1 - \mu_s^2) \alpha \quad (\text{Centro de la cimentación flexible})$$

Figura 31. Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones**. Pág. 242

Donde:

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{1+m_1^2} + m_1}{\sqrt{1+m_1^2} - m_1} \right) + m \ln \left(\frac{\sqrt{1+m_1^2} + 1}{\sqrt{1+m_1^2} - 1} \right) \right]$$

S_e = asentamiento elástico

E_s = módulo de elasticidad del suelo

μ_s = relación de Poisson del suelo

q_o = carga transmitida de la cimentación al suelo

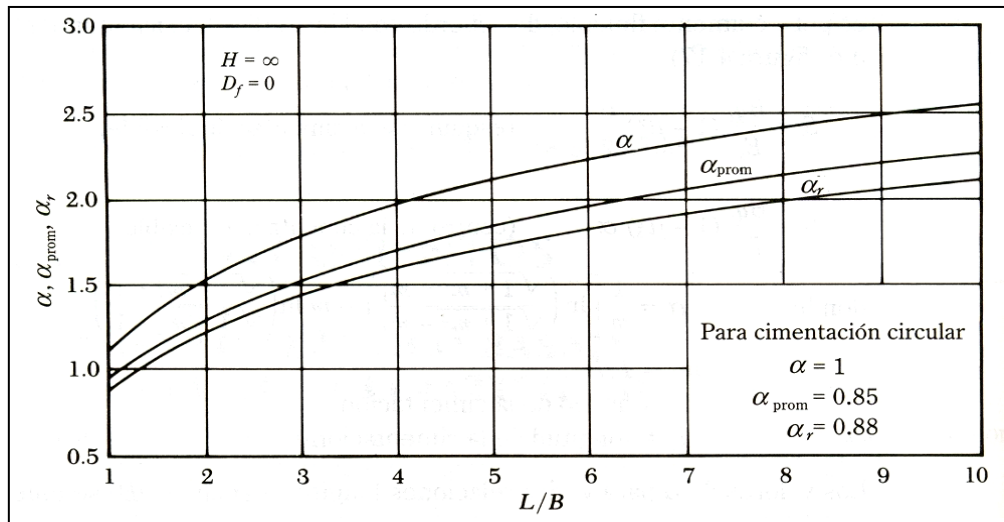
$m_1 = L/B$

B = ancho de la cimentación

L = longitud de la cimentación

Los valores de α para varias relaciones de longitud a ancho (L/B) se muestran en la Figura 32.

Figura 32. Valores de α , α_{prom} y α_r



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones**. Pág. 242

El asentamiento promedio inmediato para una cimentación flexible también se expresa como:

$$S_e = \frac{Bq_o}{E_S} (1 - \mu_S^2) \alpha_{prom} \quad (\text{Promedio para cimentación flexible})$$

La Figura 32 muestra también los valores de α_{prom} para varias relaciones L/B de una cimentación. Sin embargo si la cimentación mostrada en la Figura 31 es rígida, el asentamiento inmediato será diferente y se expresa como:

$$S_e = \frac{Bq_o}{E_S} (1 - \mu_S^2) \alpha_r \quad (\text{Cimentación rígida})$$

Los valores de α_r para varias relaciones L/B de cimentaciones también se muestran en la Figura 32. Si $Df = 0$ y $H < \infty$ debido a la presencia de una capa rígida (incompresible), como muestra la Figura 31:

$$S_e = \frac{Bq_o}{E_s} (1 - \mu_s^2) \frac{[(1 - \mu_s^2)F_1 + (1 - \mu_s - 2\mu_s^2)F_2]}{2}$$

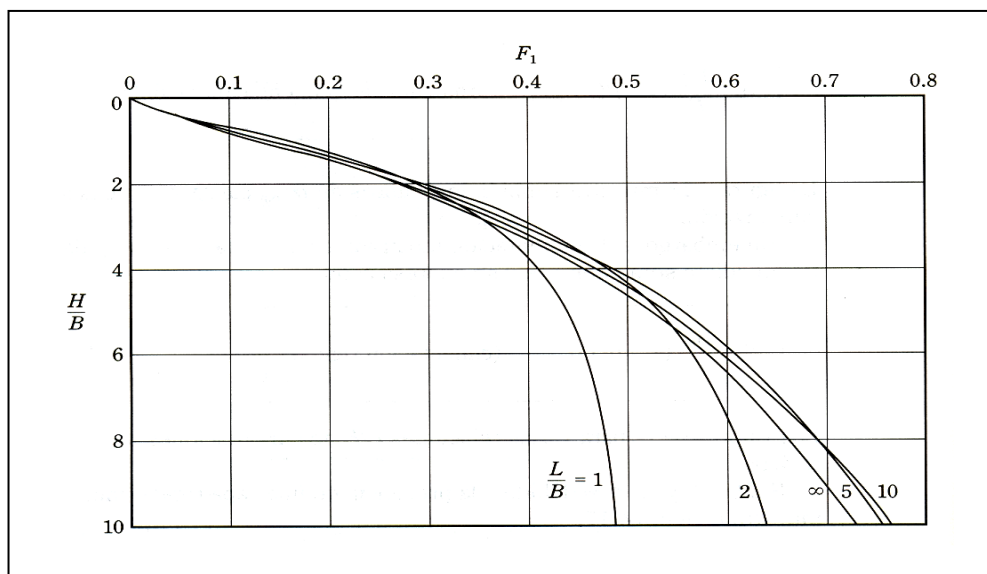
(Esquina de la cimentación flexible)

$$S_e = \frac{Bq_o}{E_s} (1 - \mu_s^2) [(1 - \mu_s^2)F_1 + (1 - \mu_s - 2\mu_s^2)F_2]$$

(Esquina de la cimentación flexible)

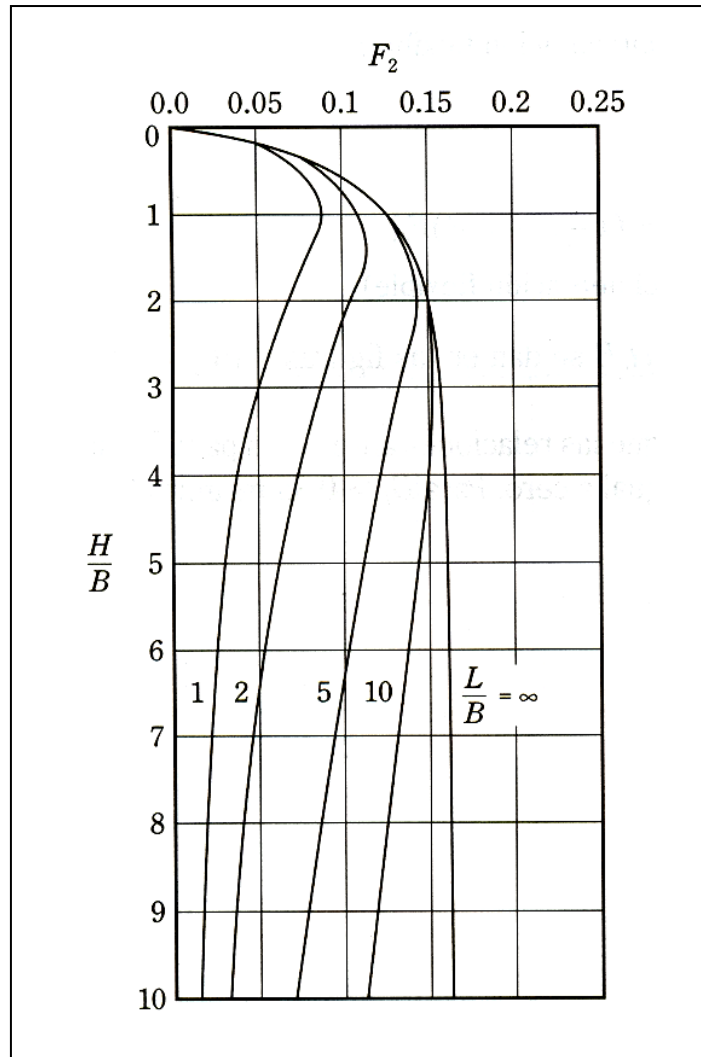
Las variaciones de F_1 y F_2 con respecto de la relación H/B se dan en las Figuras 33 y 34.

Figura 33. Variación de F_1 con H/B



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones**. Pág. 244

Figura 34. Variación de F_2 con respecto de H/B



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones.** Pág. 244

Es también importante analizar que las relaciones anteriores para S_e suponen que la profundidad de la cimentación es igual a cero. Para $Df > 0$, la magnitud de S_e decrecerá.

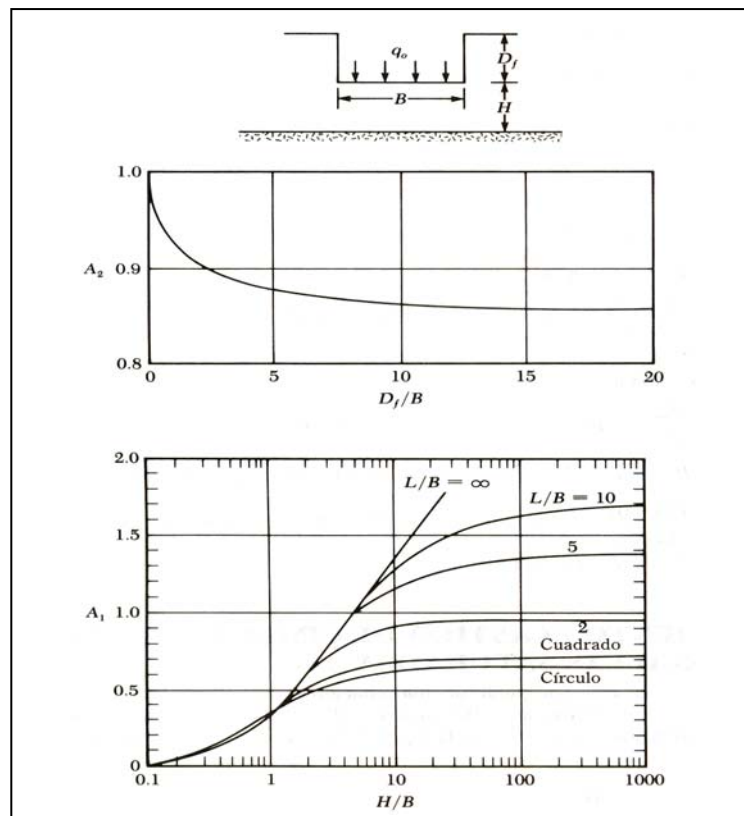
3.2 Asentamiento elástico de cimentaciones sobre arcillas saturadas

La ecuación para evaluar el asentamiento promedio de cimentaciones flexibles sobre suelos arcillosos saturados, con relación de Poisson $\mu_s = 0.5$ y la notación utilizada en la Figura 35, se puede expresar de la siguiente forma:

$$S_e = A_1 A_2 \frac{q_o B}{E_s}$$

Donde: A_1 es una función de H/B y L/B y A_2 es una función de D_f/B .

Figura 35. Valores de A_1 y A_2 para el cálculo de asentamiento elástico



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones**. Pág. 246

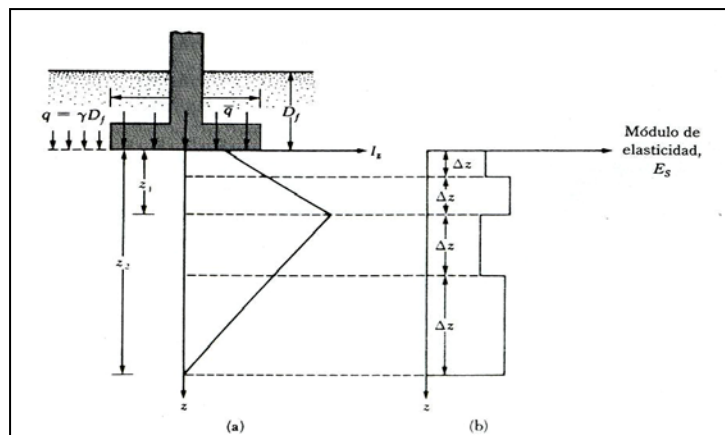
3.3 Asentamiento de suelo arenoso: uso del factor de influencia de la deformación unitaria

El asentamiento de suelos granulares también se evalúa usando un factor de influencia semiempírico. De acuerdo con este método, el asentamiento es:

$$S_e = C_1 C_2 [\bar{q} - (\gamma * D_f)] \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} \Delta z$$

- Donde:
- I_z = factor de influencia de la deformación unitaria
 - C_1 = factor de corrección para la profundidad del empotramiento de la cimentación = $1 - 0.5[(\gamma * D_f)/(\bar{q} - (\gamma * D_f))]$
 - C_2 = factor de corrección para tomar en cuenta el flujo plástico en el suelo = $1 + 0.2 \log(\text{tiempo en años}/0.1)$
 - \bar{q} = esfuerzo al nivel de la cimentación

Figura 36. Cálculo del asentamiento elástico usando el factor de influencia de la deformación unitaria



Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones**. Pág. 246

La variación del factor de influencia de la deformación unitaria con la profundidad debajo de la cimentación se muestra en la Figura 36, y luego de analizarla, para cimentaciones cuadradas o circulares tenemos que:

$$I_z = 0.1 \text{ en } z = 0$$

$$I_z = 0.5 \text{ en } z = z_1 = 0.5 B$$

$$I_z = 0 \text{ en } z = z_2 = 2B$$

Similarmente, para cimentaciones con $L/B \geq 10$ tenemos que:

$$I_z = 0.2 \text{ en } z = 0$$

$$I_z = 0.5 \text{ en } z = z_1 = B$$

$$I_z = 0 \text{ en } z = z_2 = 4B$$

En todas las expresiones anteriores: B = ancho de la cimentación y L = longitud de la cimentación. Para valores de L/B entre 1 y 10 puede interpolarse según sea necesario.

Para calcular el asentamiento de suelos granulares se requiere primero la evaluación de la variación aproximada del módulo de elasticidad con la profundidad. La evaluación se hace con los números de penetración estándar o resistencias de penetración de cono.

El estrato de suelo se divide en varias capas a una profundidad de $z = z_2$, y el asentamiento de cada una se calcula. La suma de los asentamientos de todas las capas es igual a S_e .

3.4 Rango de los parámetros del material para calcular asentamientos elásticos

Se ha presentado con anterioridad las ecuaciones para calcular el asentamiento inmediato de cimentaciones, que contienen parámetros elásticos, como E_s y μ_s . Si los resultados de pruebas de laboratorio para esos parámetros no están disponibles, deben hacerse varias hipótesis realistas. La Tabla XIV muestra el rango aproximado de los parámetros elásticos para varios suelos.

Tabla XIV. Parámetros elásticos para varios suelos

Tipo de Suelo	Módulo de elasticidad, E_s		Relación de Poisson, μ_s
	lb/pulg ²	MN/m ²	
Arena suelta	1,500 – 3,500	10.35 – 24.15	0.20 – 0.40
Arena densa media	2,500 – 4,000	17.25 – 27.60	0.25 – 0.40
Arena densa	5,000 – 8,000	34.50 – 55.20	0.30 – 0.45
Arena limosa	1,500 – 2,500	10.35 – 17.25	0.20 – 0.40
Arena y grava	10,000 – 25,000	69.00 – 172.50	0.15 – 0.35
Arcilla suave	600 – 3,000	4.1 – 20.7	
Arcilla media	3,000 – 6,000	20.7 – 41.4	0.20 – 0.50
Arcilla firme	6,000 – 14,000	41.4 – 96.6	

Fuente: Braja M. Das. **Principios de ingeniería de cimentaciones**. Pág. 250

Muchas veces se correlacionan los valores del módulo de elasticidad, E_s , con el número de penetración estándar en campo, N_F y con la resistencia a la penetración de cono q_c .

El módulo de elasticidad de la arena se da por la expresión:

$$E_S = 766N_F \text{ (kN/m}^2\text{)} \text{ y } E_S = 8N_F \text{ (ton/pie}^2\text{)}$$

Similarmente, pero utilizando la resistencia a la penetración de cono q_c

$$E_S = 2.5 q_c \text{ (para cimentaciones cuadradas y circulares)}$$

$$E_S = 3.5 q_c \text{ (para cimentaciones corridas)}$$

El módulo de elasticidad de arcillas normalmente consolidadas se estima como:

$$E_S = 250c \text{ a } 500c$$

El módulo de elasticidad para arcillas preconsolidadas se estima como:

$$E_S = 750c \text{ a } 1000c$$

Donde: c = cohesión no drenada de suelo de arcilla

CONCLUSIONES

1. El ensayo de consolidación en laboratorio permitió conocer la forma en que se comportará la arcilla cuando ésta este siendo deformada por la presión creciente producida por la cimentación. Por ésta situación, cuando se realiza dicho ensayo, se deben seguir los pasos pertinentes para no incidir en los errores más comunes. Si durante el ensayo, que permite conocer el índice de compresión, el índice de expansibilidad, el peso específico y la relación de vacíos inicial de la arcilla, se incide en errores y se obtienen datos imprecisos, el cálculo del asentamiento por consolidación será erróneo.
2. En la elaboración de las curvas de consolidación y de la curva de compresibilidad, se utilizaron métodos manuales y computarizados. La diferencia de ambas repercute en la exactitud de los resultados, por lo que conviene definir en el momento de realizar el ensayo, de qué manera se elaborarán las mismas.
3. El algoritmo que se desarrolló para calcular el asentamiento por consolidación es confiable y se necesita un considerable conocimiento de Mecánica de Suelos para comprenderlo. La única posible complicación del mismo incide en la elaboración del ensayo de consolidación en laboratorio, ya que es necesario tener experiencia en la utilización del aparato y en la lectura del deformímetro.

4. El análisis adecuado del perfil estratigráfico del suelo permite que el cálculo del asentamiento por consolidación se simplifique, sobre todo por la facilidad que existe de encontrar la gravedad específica de cada tipo de suelo en el laboratorio.

5. El valor calculado del asentamiento por consolidación difiere notablemente cuando la arcilla es normalmente consolidada y preconsolidada. La razón que el valor del asentamiento calculado sea grande en una arcilla normalmente consolidada, es que en la misma no han actuado presiones verticales efectivas mayores que las existentes en la actualidad, y al contrario, como en las arcillas preconsolidadas ya han existido presiones verticales, el valor calculado es más pequeño.

6. Si después de calcular el asentamiento por consolidación en una arcilla normalmente consolidada, se analiza que ésta se asienta demasiado luego de la construcción de la cimentación, es necesario que el ingeniero tome la decisión más adecuada para que la estructura no sufra asentamientos exagerados durante su período de diseño.

7. El cálculo del asentamiento por consolidación es únicamente aplicable a suelos arcillosos saturados, ya que los suelos arenosos y con presencia significativa de grava, presentan asentamientos inmediatos.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario que la muestra de arcilla que se utilice para elaborar el ensayo de consolidación sea lo más inalterada posible, debido a que si la arcilla pierde humedad, los resultados no reflejarán el comportamiento real de la misma, y por lo tanto el cálculo del asentamiento por consolidación no será confiable.
2. El ensayo de consolidación debe realizarse en un lugar con temperatura ambiente, para que la humedad de la arcilla durante el ensayo no disminuya.
3. Es imprescindible la utilización de los instrumentos adecuados para el tallado del disco, con la finalidad que la muestra quede bien confinada dentro del mismo, así como la calibración del consolidómetro y deformímetro antes de empezar a aplicarle carga a la cazuela del consolidómetro.
4. Procurar exactitud en la elaboración de las gráficas de consolidación y la gráfica de compresibilidad. El cálculo del asentamiento por consolidación depende de los valores corregidos de las deformaciones que se calculan a partir de las curvas de consolidación, y del cálculo del índice de compresión y expansibilidad, por medio de la curva de compresibilidad.

5. Analizar previamente si la arcilla es normalmente consolidada o preconsolidada, debido a que el cálculo del asentamiento por consolidación en estos dos tipos de arcillas difiere bastante.

6. Identificar de manera exacta el perfil estratigráfico del suelo donde se construirá la cimentación, haciendo pozos a cielo abierto para extraer la muestra y conocer el espesor de los estratos, esto con la finalidad que el cálculo del asentamiento por consolidación se simplifique.

7. Predimensionar con precisión la cimentación antes de calcular el asentamiento por consolidación, ya que es necesario conocer las dimensiones de la misma para calcular los incrementos de presión en la arcilla y en consecuencia el asentamiento por consolidación.

8. Cuando sea posible elaborar el ensayo de consolidación con equipo electrónico, es necesario comparar analíticamente los resultados de éste, con los del ensayo elaborado con la instrumentación convencional, para corroborar que los resultados no difieran entre sí.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Peter L. Berry y David Reid. **Mecánica de Suelos.** (s.e; Colombia: Editorial McGraw-Hill, 1993). pp 50.
2. Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez. **Mecánica de suelos, Tomo 1, Fundamentos de la Mecánica de Suelos.** (Tercera Edición; México: Editorial Limusa, 2005). pp 247.
4. Braja M. Das **Principios de ingeniería de cimentaciones.** (Cuarta Edición; México: International Thomson Editores, 2001). pp 256.

REFERENCIA ELECTRÓNICA

3. <http://carreras.frba.utn.edu.ar/civil/geotecnia/InformesobreConsolidacion.pdf>
Agosto de 2007.

BIBLIOGRAFÍA

1. Berry, Peter L. y David Reid. **Mecánica de Suelos**. Colombia: Editorial McGraw-Hill, 1993. 415 pp.
2. Bowles, Joseph E. **Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil**. México: Editorial McGraw-Hill, 1981. 213 pp.
3. Crespo Villalaz, Carlos. **Mecánica de Suelos y Cimentaciones**. Quinta Edición. México: Editorial Limusa, 2005. 650pp.
4. Das, Braja M. **Fundamentos de Ingeniería Geotécnica**. México: Editorial Thomson Learning, 2001. 594 pp.
5. Das, Braja M. **Principios de ingeniería de cimentaciones**. Cuarta Edición. México: International Thomson Editores, 2001. 862 pp.
6. Delgado Vargas, Manuel. **Ingeniería de Cimentaciones**. Segunda Edición. Colombia: Editorial Alfaomega, 2000. 541 pp.
7. Juárez Badillo, Eulalio y Alfonso Rico Rodríguez. **Mecánica de suelos, Tomo 1, Fundamentos de la Mecánica de Suelos**. Tercera Edición. México: Editorial Limusa, 2005. 642 pp.
8. Juárez Badillo, Eulalio y Alfonso Rico Rodríguez. **Mecánica de suelos, Tomo 2, Teoría y aplicaciones de la Mecánica de Suelos**. Tercera Edición. México: Editorial Limusa, 2003. 703 pp.
9. Lambe, William y Robert Whitman. **Mecánica de suelos**. México: Editorial Limusa, 2005. 582 pp.

10. Peck, Ralph B. y otros. **Ingeniería de Cimentaciones**. México: Editorial Limusa, 2006. 557 pp.
11. Sowers, George B. y George F. Sowers. **Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones**. Sexta reimpresión de la primera edición. México: Editorial Limusa, 1990. 677 pp.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

12. <http://carreras.frba.utn.edu.ar/civil/geotecnia/InformesobreConsolidacion.pdf>
Agosto de 2007.
13. http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/10_consolidacion.pdf
Agosto de 2007.
14. <http://grupos.unican.es/gidai/asignaturas/CI/Cimentaciones.pdf>
Agosto de 2007.
15. <http://www.umng.edu.co/www/resources/rev16.1%20art05.pdf>
Septiembre de 2007
16. http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/ms1/consolidacion1.pdf
Septiembre de 2007.

ANEXOS

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

FECHA: _____ PROYECTO: _____ POZO: _____

OPERADOR: _____ LUGAR: _____ MUESTRA: _____

PROFUNDIDAD: _____

DESCRIPCIÓN: _____

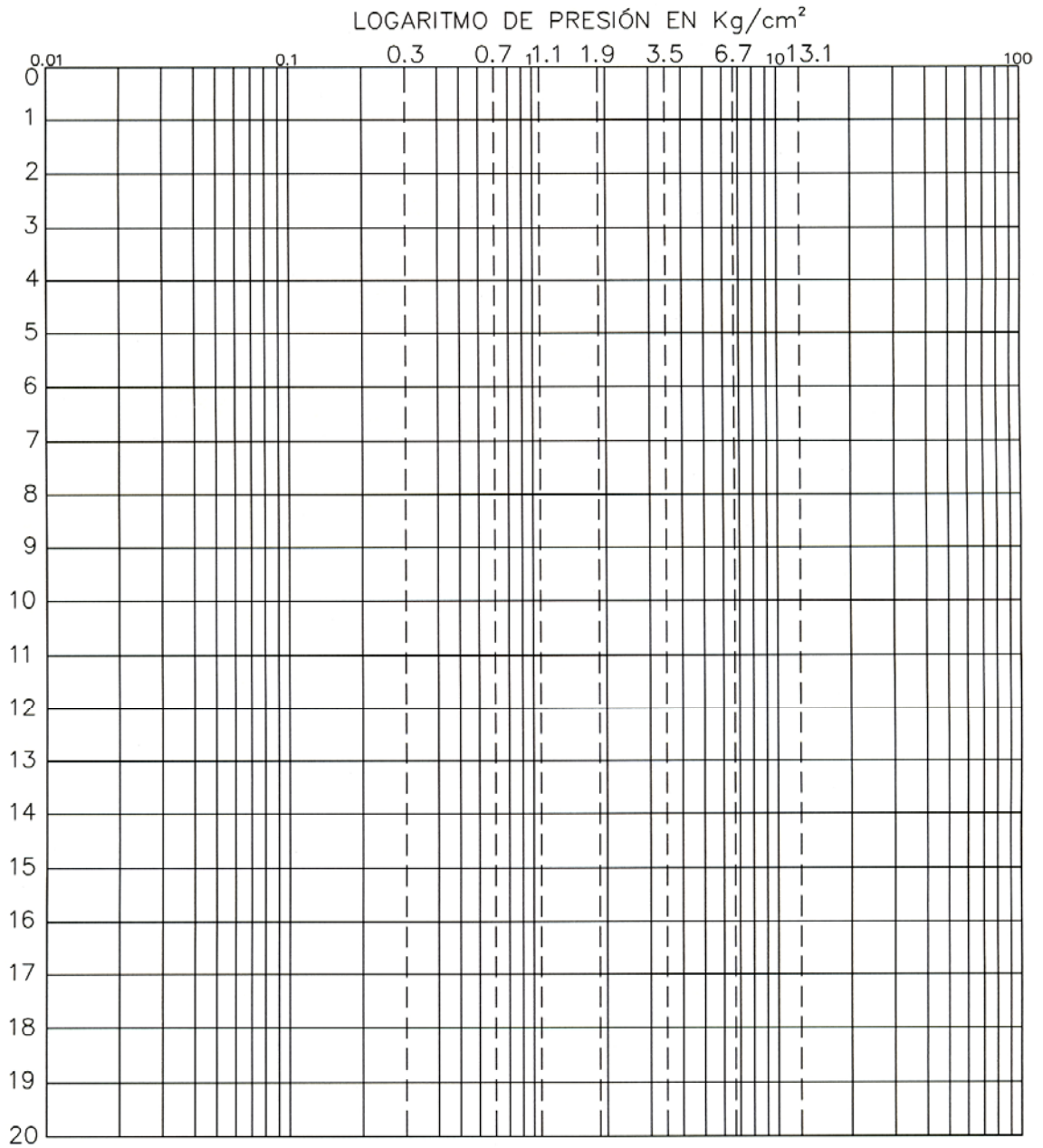
DIÁMETRO: 6.35 cm ÁREA: 31.65 cm² ho: 2.54 cm PNHo: _____ GS: _____

HUMEDAD	TARA 1	TARA 2	PASTILLA		
RECIP #	_____	_____	INICIAL	FINAL	$\gamma = \frac{PNH}{80.39} =$ _____ gr/cm^3
PBH gr	_____	_____	_____	_____	$\gamma_D = \frac{PNS}{80.39} =$ _____ gr/cm^3
PBS gr	_____	_____	_____	_____	$h_s = \frac{Y_d h_o}{G \gamma_w} =$ _____ cm
TARA gr	_____	_____	_____	_____	
DIF gr	_____	_____	_____	_____	
PNH gr	_____	_____	_____	_____	
PNS gr	_____	_____	_____	_____	
w	%	%	$w_o =$ _____	$w_f =$ _____	
Promedio	_____		$e = \frac{h}{h_s} - 1$		

PRESIÓN Kg/cm ²	LECTURA	DEFORM dh	ESPESOR h	e	DEFORM %	m _v	c _v
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
Descarga:	_____	_____	_____	Carga:	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____

CURVA DE COMPRESIBILIDAD

Proyecto _____ Humedad _____ %
Lugar _____ Densidad Seca _____
Pozo _____ Relación de Vacíos _____
Muestra _____ Densidad Máxima _____
Profundidad _____ Humedad Óptima _____ %
Fecha _____ Grado de Compactación _____ %



ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Interesado _____ Proyecto _____

Informe No. _____ Fecha _____

RESULTADOS _____

Ensayo No.	Prof. (m)	G.S.	W (%)	γ_d (gr/cm ³)	σ'_{V_1} (Kg/cm ²)	e_o	σ'_y (Kg/cm ²)	C_s	C_c	C_p (m ² /seg)									
										0.1 (Kg/cm ²)	0.3 (Kg/cm ²)	0.7 (Kg/cm ²)	1.1 (Kg/cm ²)	1.9 (Kg/cm ²)	3.5 (Kg/cm ²)	6.7 (Kg/cm ²)	13.1 (Kg/cm ²)		

DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

IDENTIFICACIÓN DE MATRAZ			
CAPACIDAD DE MATRAZ (NOMINAL)		cc	cc
PESO MATRAZ LIMPIO Y SECO	W_m	gr	gr
PESO MATRAZ + SUELO SECO	W_{ms}	gr	gr
PESO SUELO SECO	W_s	gr	gr
PESO MATRAZ + SUELO + AGUA	W_{msw}	gr	gr
PESO MATRAZ + AGUA	W_{mw}	gr	gr
TEMPERATURA DEL AGUA	T	C°	C°
GRAVEDAD ESPECÍFICA	$= \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{msw}}$		
PROMEDIO			

IDENTIFICACIÓN DE MATRAZ			
CAPACIDAD DE MATRAZ (NOMINAL)		cc	cc
PESO MATRAZ LIMPIO Y SECO	W_m	gr	gr
PESO MATRAZ + SUELO SECO	W_{ms}	gr	gr
PESO SUELO SECO	W_s	gr	gr
PESO MATRAZ + SUELO + AGUA	W_{msw}	gr	gr
PESO MATRAZ + AGUA	W_{mw}	gr	gr
TEMPERATURA DEL AGUA	T	C°	C°
GRAVEDAD ESPECÍFICA	$= \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{msw}}$		
PROMEDIO			