

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

**Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia**

**“ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL
EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE – TACNA,
APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA
EN DIFERENCIAS FINITAS”**

TESIS

Presentada Por:

Bach. GUADALUPE SORAYDA CALAMULLO ARCAYA

Para optar el Título de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

**TACNA – PERÚ
2019**

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA – GEOTECNIA

TESIS

“ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS
DE LA ZONA DE ITE – TACNA, APLICANDO LA MODELACIÓN
NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS”

Tesis sustentada y aprobada el 25 de noviembre del 2019, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE



Ing. Pío Coila Valdez

MIEMBRO – SECRETARIO



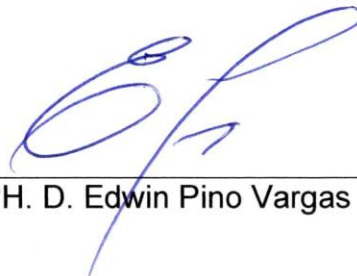
Mgr. Gina Chambi Tapahuasco

MIEMBRO



Mgr. Fredy Cabrera Olivera

ASESOR DE TESIS



PH. D. Edwin Pino Vargas

DEDICATORIA

A DIOS: Por darme la vida.

A MIS PADRES: Por darme la oportunidad de estudiar.

A MIS HERMANOS: Por apoyarme siempre en cada nuevo reto.

A MI ESPOSO: Por impulsarme cada día para conseguir mis metas.

A MIS HIJOS: Cristian y Alexandra, que son mi motor y motivo.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a mis padres Marcelino y Adela, por darme la vida y la oportunidad de ser profesional.

A mi asesor PhD Edwin Martin Pino Vargas por su apoyo en la elaboración de este trabajo.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica y Geotecnia de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por los conocimientos brindados en aula.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	3
1.1 Ubicación y accesibilidad de la zona de estudio	3
1.2 Ubicación geográfica	4
1.3 Límites	4
1.4 Clima y vegetación.....	4

1.5	Tipo de investigación	5
CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA		6
2.1	Descripción del problema	6
2.2	Formulación del problema	7
2.2.1	Formulación general.	7
2.2.2	Formulación específica	7
2.3	Justificación e importancia	8
2.3.1	Desde el punto de vista científico	8
2.3.2	Desde el punto de vista económico	9
2.4	Objetivos	9
2.4.1	Objetivo general	9
2.4.2	Objetivos específicos	9
2.5	Hipótesis	10
1.5.1.	Hipótesis general	10
1.5.2.	Hipótesis específicas	10

CAPÍTULO III GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA.....	11
3.1 Geomorfología	11
3.1.1 Geomorfología Regional	11
3.1.2 Geomorfología Local.....	14
3.2 Geología	16
3.2.1 Geología Regional	16
3.2.2 Geología Local.....	19
CAPÍTULO IV MARCO TEÓRICO	21
4.1 Antecedentes del estudio.....	21
4.2 Bases teóricas	25
4.2.1 Subsistencia	25
4.2.2 Tipos de subsistencia	26
4.2.3 Consolidación unidimensional de los suelos.....	34
4.2.4 Ecuación de consolidación unidimensional usando el método de diferencias finitas	47

4.2.5	Método de Crank- Nicholson	53
4.3	Definición de términos	54
4.3.1	Subsidencia	54
4.3.2	Consolidación	55
4.3.3	Compactación	55
4.3.4	Teoría de la consolidación (Terzaghi 1925)	55
CAPÍTULO V MARCO METODOLÓGICO		57
5.1	Procesamiento y análisis de datos.....	57
5.1.1	Simulación de consolidación unidimensional para un estrato compresible.....	57
5.1.2	Simulación de consolidación unidimensional para varios estratos compresibles	65
CAPÍTULO VI RESULTADOS		77
6.1	Resultados de ensayos de laboratorio.....	77
6.1.1	Ensayo de densidad in situ (Cono de arena)	77
6.1.2	Ensayo de contenido de humedad.....	78

6.1.3	Grado de saturación	79
6.1.4	Análisis granulométrico de suelo por tamizado.....	79
6.1.5	Ensayo de límite de consistencia.....	80
6.1.6	Ensayo de peso específico de grava y arena	80
6.1.7	Perfil estratigráfico	81
6.1.8	Resultados de ensayo de consolidación unidimensional	81
6.2	Resultados para la consolidación unidimensional para un estrato (modelo propuesto).....	86
6.3	Resultados para la consolidación unidimensional para varios estratos (modelo calibrado).....	88
CAPÍTULO VII DISCUSIÓN.....		89
7.1	Análisis de resultados de ensayo de consolidación unidimensional para un estrato	89
7.2	Análisis de resultados de ensayo de consolidación unidimensional para varios estratos.....	90
CONCLUSIONES		92

RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Historia de los casos de subsidencia	24
Tabla 2. Datos de simulación para consolidación unidimensional para un estrato compresible.....	63
Tabla 3. Datos de simulación para consolidación unidimensional para varios estratos.....	75
Tabla 4. Resultados de densidad in situ (Cono de arena)	78
Tabla 5. Resultados de contenido de humedad.....	78
Tabla 6. Resultados de grado de saturación	79
Tabla 7. Análisis granulométrico de suelo por tamizado	79
Tabla 8. Resultados de límite de consistencia	80
Tabla 9. Resultado de peso específico	80
Tabla 10. Resultados de perfil estratigráfico	81
Tabla 11. Resultados de ensayo de consolidación unidimensional. Etapa de carga.....	82

Tabla 12. Resultados de ensayo de consolidación unidimensional. etapa de descarga	83
Tabla 13. Resultado de asentamiento y grado de consolidación para un estrato	86
Tabla 14. Resultado de consolidación unidimensional para un estrato ...	87
Tabla 15. Resultado de asentamiento y grado de consolidación de varios estratos.....	88
Tabla 16. Análisis de resultado de ensayo de consolidación unidimensional.....	89
Tabla 17. Análisis de resultado de ensayo de consolidación unidimensional para varios estratos.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación.....	3
Figura 2. Unidades geomorfológicas	13
Figura 3. Geomorfología de la zona de estudio	14
Figura 4. Mapa geológico de la zona de estudio.....	15
Figura 5. Formaciones geológicas	18
Figura 6. Torre de Pisa (Subsidencia por carga)	23
Figura 6. Subsistencia por erosión subterránea.	27
Figura 7. Subsistencia por extracción de fluidos.....	28
Figura 8. Subsistencia por disolución subterránea en sal, yeso o rocas carbonáticas.....	29
Figura 9. Subsistencia tectónica	30
Figura 10. Subsistencia por efecto de la minería.....	31
Figura 11. Subsistencia por hidrocompactación	32

Figura 12. Subsistencia por flujo lateral en materiales salinos y arcillas plásticas	33
Figura 13. Subsistencia por carga	34
Figura 14. Prisma rectangular del suelo infinitamente pequeño	36
Figura 15. Estrato de drenaje por dos fronteras.....	43
Figura 16. Estrato con drenaje impedido en su frontera inferior	44
Figura 17. Representación del área de la isócrona de exceso de presión hidrostática en un tiempo t	46
Figura 18. Modelo de discretización continuo	48
Figura 19. Gráfica de la interpretación de las aproximaciones de diferencias	52
Figura 20. Modelo de discretización del estrato.....	59
Figura 21. Sistema tomado por N_s estratos compresibles.....	66
Figura 22. Discretización de un sistema formado por N_s estratos compresible.....	67

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Codificación del programa	100
Anexo 2.	VARIABLES EMPLEADAS EN EL PROGRAMA	110
Anexo 3.	Ensayos de laboratorio	111
Anexo 4.	Anexo de fotografía.....	134

RESUMEN

El presente trabajo pretende realizar un análisis de la subsidencia unidimensional en los suelos de un sector de los humedales de Ite - Tacna, aplicando la modelación numérica en diferencias finitas.

Para lograr el objetivo se utilizó el método de Crank-Nicholson, creando un lenguaje de programación, utilizando la ecuación de consolidación de suelo de Terzaghi.

Para calibrar nuestro modelo con dos escenarios (para 01 estrato y para varios estratos), se usó el modelo propuesto por Schiffmann & Stein, los cuales emplearon la serie de Fourier; asimismo, se compararon los resultados del modelamiento, con los resultados obtenidos en laboratorio.

Para el escenario de 01 estrato, obtuvimos para 5 años un grado de consolidación de 0,8640 y un asentamiento total de 0,1751 metros, en el caso de los datos obtenidos por Schiffmann & Stein 0,9414 y 0,1900 metros, en el caso de los resultados de laboratorio 0,9550 y 0,1814 metros aproximándose a nuestros resultados, lo cual nos indica que la simulación realizada es aceptable.

Para el escenario de varios estratos, se obtuvo en 5 años, un grado de consolidación de 0,252, esto se da en un tiempo de 740 días, los resultados son los mismos que obtuvieron Schiffmann & Stein, en el caso de los resultados de laboratorio 0,246 en un tiempo de 740 días, comprobando que la simulación funciona para poder trabajar varios estratos.

Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar propiedades físicas del suelo, presentando una densidad de 2,206 gr/cm³, contenido de humedad de 32,66 %, una clasificación SC, y A-6, límite líquido de 33%, límite plástico de 25,94% y un índice de plasticidad de 7,06.

Palabras clave: Subsistencia unidimensional, modelación numérica, diferencias finitas.

ABSTRACT

The present work intends to carry out an analysis of the one - dimensional subsidence in the soils of a sector of Ite wetlands - Tacna area, applying the numerical modeling in finite differences.

To achieve the objective, the Crank-Nicholson method was used, creating a programming language, using Terzaghi's soil consolidation equation.

To calibrate our model with two scenarios (for 01 stratum and for several strata), the model proposed by Schiffmann & Stein was used, which used the Fourier series; Likewise, the results of the modeling were compared with the results obtained in the laboratory.

For the 01 stratum scenario, we obtained a consolidation degree of 0,8640 and a total settlement of 0,1751 meters for 5 years, in the case of data obtained by Schiffmann & Stein 0,9414 and 0,1900 meters, in the case of laboratory results 0,9550 and 0,1814 meters approaching our results, which indicates that the simulation performed is acceptable.

For the scenario of several strata, a consolidation degree of 0,252 was obtained in 5 years, this occurs in a time of 740 days, the results are the same as those obtained by Schiffmann & Stein, in the case of laboratory

results 0,226 in a time of 740 days, checking that the simulation works to be able to work several strata.

Laboratory tests were carried out to determine physical properties of the soil, presenting a density of 2,206 gr / cm³, moisture content of 32,66%, SC classification, and A-6, liquid limit of 33%, plastic limit of 25,94% and a plasticity index of 7,06.

Keywords: One-dimensional subsidence, numerical modeling, finite differences.

INTRODUCCIÓN

La subsidencia es un riesgo natural usualmente caracterizado por movimientos lentos de tierra, por esta razón rara vez se convierte en peligro para la vida humana. Sin embargo, esto puede tener varias áreas de interés sobre unos periodos de tiempo, causando deformaciones que pueden variar de unos pocos milímetros a varios metros. Por lo tanto, si esto afecta áreas metropolitanas puede causar importantes daños estructurales e infraestructurales con altos costos consecuentes. (Tessitore, 2014, p.2)

El término genérico de subsidencia hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o submarina. La subsidencia terrestre, en la cual se centra el presente trabajo, es un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas. (Corapcioglu, 1984, p.372)

La subsidencia por carga es “La acumulación natural sucesiva de sedimentos o determinados tipos de cimentaciones pueden ocasionar la

consolidación del terreno como consecuencia del peso que ejercen los sedimentos o las construcciones. Esta subsidencia se produce por una reducción gradual de los huecos del suelo” (Tomás et al., 2009, p.297).

La consolidación “Es la reducción gradual de volumen del suelo por compresión debido a la aplicación de cargas estáticas. También puede darse por pérdida de aire o agua, o por un reajuste de la fábrica textural” (Duque & Escobar, 2016, p.139).

Para generar la simulación se puede emplear el método de diferencias finitas de Crank-Nicholson. La discretización, se da cuando el espesor total del estrato compresible H , sea dividido en M intervalos iguales de tamaño Δz ; esto con respecto al tiempo, se divide en cuantas partes sea necesario, cada uno en una longitud Δt .

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Ubicación y accesibilidad de la zona de estudio

El Distrito de Ite se encuentra situado en la Región de Tacna, Provincia de Jorge Basadre, ubicado en el sistema de proyección de coordenadas (WGS 84) UTM Zona 19S; con coordenadas Norte: 8024011 m. y Este: 291770 m., con una altitud de 175 m.s.n.m., tiene un área de 848,34 Km². Figura 1

Es accesible por vía terrestre desde la ciudad de Tacna (95 Km.), por la carretera costanera, con un tiempo aproximado de 1 hora 20 minutos.

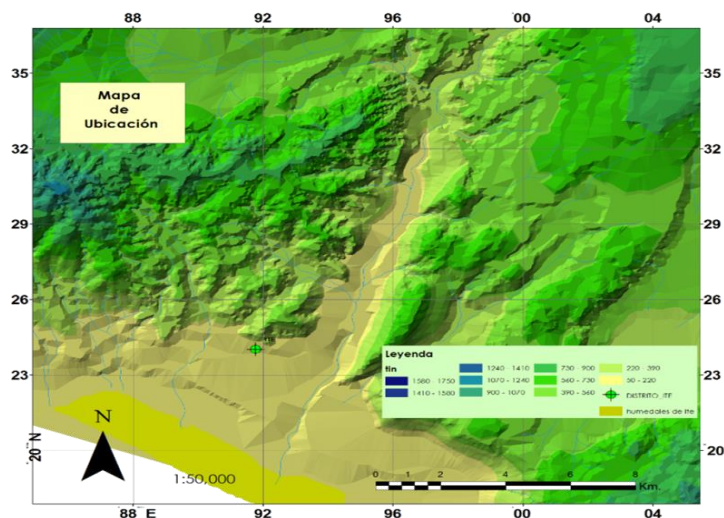


Figura 1. Mapa de Ubicación

1.2 Ubicación geográfica

- País : Perú
- Región : Tacna
- Provincia : Jorge Basadre Grohmann
- Distrito : Ite

1.3 Límites

- Este : Distrito de Locumba
- Oeste : Océano Pacífico
- Sur : Distrito de Sama Las Yaras
- Norte : Provincia de Ilo (Moquegua)

1.4 Clima y vegetación

La zona de estudio se caracteriza por presentar un clima desértico y cálido con escasa precipitación durante los meses de abril y mayo, la temperatura media registrada es de 19 °C, con valores máximos de 32 °C, para los meses de enero y febrero. La humedad relativa media es de 72%, con valores máximos de 89% para los meses de setiembre y octubre; con un mínimo de 60% para el mes de febrero.

Respecto a la cobertura vegetal, se tiene vegetación silvestre entre los cuales destacan Verdolaga, hierba de la culebra, Junco, Grama salada, Totorá, Tiquil tiquil, Altamisa, Trébol, Carrizo y variedades de Cactus; asimismo, vegetación cultivada como hortalizas, ají, maíz, trigo, papa, alfalfa, cebolla, olivo, vid y frutales.

1.5 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo experimental y analítico pues basándonos en el método de diferencias finitas, determinaremos el grado de consolidación del terreno, y analizaremos las posibles deformaciones que se presenten en la zona de estudio, planteando una propuesta de amortiguamiento.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Descripción del problema

La zona de estudio se encuentra ubicada en el distrito de Ite, específicamente en los humedales del mismo nombre, la que está compuesta de sedimentos arenosos, limosos y limos arcillosos, con plasticidad de media a alta; presencia de niveles freático alto, que ante la presencia de cargas puede sufrir subsidencia.

La subsidencia es un fenómeno que implica asentamiento en el suelo, en otras palabras, hundimiento, esto debido a varios factores, los cuales pueden ser naturales o causados por la actividad humana; si esta se da de forma natural, será un proceso muy lento, pero si a su vez ocurre acciones antrópicas estas aceleran la subsidencia, afectando las cimentaciones, causando agrietamiento en las estructuras.

Si tomamos en cuenta las características antes mencionadas de la zona de estudio, en la cual podemos observar que los sedimentos no están consolidados, y si a éste le adicionamos el incremento del peso de las

estructuras, producirán grandes cambios en el estado tensional, todo esto nos dará como consecuencia subsidencia asociada a procesos antrópicos.

Ante esta situación se ve la necesidad de usar una metodología para que permita determinar esta subsidencia en un corto tiempo y conocer dicho proceso físico, para tomar medidas correctivas en el diseño de las estructuras proyectadas.

2.2 Formulación del problema

2.2.1 Formulación general.

Como analizar la subsidencia unidimensional de un sector de los humedales de la zona de Ite – Tacna, tomando en cuenta las características geotécnicas.

2.2.2 Formulación específica

- Como determinar la subsidencia unidimensional con flujo de agua vertical, para un solo estrato compresible.
- Como determinar la subsidencia unidimensional con flujo de agua vertical, para varios estratos compresibles.
- Como poder determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

2.3 Justificación e importancia

2.3.1 Desde el punto de vista científico

Es importante conocer el efecto de la subsidencia del suelo, asociado a varios procesos naturales y antrópicos. Los cuales serían menos complejos de resolver si tuviéramos todos los datos necesarios, pero sabemos que esto es casi imposible, por las características heterogéneas de las formaciones geológicas, es por ello la importancia de estudiar y analizar metodologías que puedan generar modelos para dar solución a este problema, en un corto tiempo. El método de las diferencias finitas consiste en la construcción de una malla de manera estructurada en la cual se discretiza, de forma tal que las variables dependientes existen solo en puntos discretos, básicamente consiste en reemplazar a una derivada por la expresión equivalente en términos de diferencias. La modelación numérica en diferencias finitas, usando el esquema de Crank-Nicolson en un esquema implícito alterno exacto en segundo orden tanto en espacio como en tiempo, basado en la teoría de Karl Terzaghi, nos ayudará a determinar la subsidencia del suelo, de forma más sencilla. (Terzaghi, 1943, p.269).

2.3.2 Desde el punto de vista económico

Definida la importancia del modelo y analizada la metodología, se podrá construir estructuras con un mejor diseño, evitando pérdidas económicas por el colapso de las estructuras por subsidencia de suelo, y sobre todo pérdidas humanas.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Analizar la subsidencia unidimensional en un sector de los humedales de suelos de la zona de Ite – Tacna, aplicando la modelación numérica en diferencias finitas.

2.4.2 Objetivos específicos.

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, en la zona de estudio.
- Determinar la subsidencia unidimensional con flujo de agua vertical, para un solo estrato compresible, empleando el método de diferencias finitas de Crank – Nicholson.
- Determinar la subsidencia unidimensional con flujo de agua vertical, para varios estratos compresibles, haciendo uso del método de diferencias finitas de Crank – Nicholson.

2.5 Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

El método de diferencias finitas puede resolver el modelo para el análisis de subsidencias, permitiendo dar distintas soluciones para evitar la consolidación, tomando en cuenta las características geotécnicas y geomecánicas, así como la interacción entre el suelo y las estructuras.

1.5.2. Hipótesis específicas

- El empleo del método de diferencias finitas de Crank – Nicholson, puede ayudar a determinar la subsidencia unidimensional con flujo de agua vertical en un solo estrato.
- El uso de la metodología de diferencias finitas de Crank – Nicholson, puede ayudar a determinar la subsidencia unidimensional con flujo de agua vertical en más de un estrato.

CAPÍTULO III

GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA

3.1 Geomorfología

La siguiente información ha sido extraída del Cuadrangulo de Ilo y Locumba, en el cual se detallan las siguientes unidades geomorfológicas.

(Narvaez, 1964, p.16-41)

3.1.1 Geomorfología Regional

3.1.1.1 Faja Litoral

Que esta unidad geomorfológica comprende el terreno bajo que se extiende entre la ribera del mar y el pie de la Cordillera de la Costa, alcanzando una altura de hasta 400 metros, con ancho variable de entre 3 y 7 kilómetros. El tramo de la faja litoral se extiende con dirección Noroeste Suroeste, desde Punta de Coles hasta Morro Sama, presenta interrupciones de roca ígnea que llega hasta la orilla del mar terminado en acantilados bajos. El ancho máximo de la Faja Litoral de este tramo Sur se encuentra en la boca del río Locumba, donde se observan dos terrazas aluviales de 50 a 100 metros sobre el nivel del mar. La terraza superior constituye la Pampa de Ite, actualmente irrigada y se prolonga en ambas

márgenes del río hasta unos 10 kilómetros aguas arriba de la desembocadura. El perfil del litoral en el sector Sur presenta suaves salientes que corresponden a los espolones ígneos y los tramos casi rectos en las zonas formadas de depósitos semiconsolidados de las terrazas y abanicos aluviales.

3.1.1.2 Cordillera de la Costa

Paralelamente a la ribera pacífica se extiende desde la Península de Paracas hasta Chile, una faja montañosa de relieve moderado que ha sido denominado Cordillera de la Costa. En el área de Ilo a Locumba esta compuesto de roca plutónica de edad Cretácea a Terciaria y de rocas volcánicas y sedimentarias del Triásico y Jurásico. Los gneis afloran a la orilla del mar en una extensión relativamente pequeña del Cuadrángulo de Ilo.

3.1.1.3 Pampa Costanera

A lo largo de la costa sur del Perú y ocupando una extensa depresión entre la Cordillera de la Costa y el Frente Occidental de los Andes, se presenta un territorio llano a suavemente ondulado que ha resultado de la acumulación de sedimentos clásicos del Terciario Superior y Cuaternario. Este territorio se ha disectado por numerosos valles transversales que separan amplias superficies planas conocidas regionalmente con el

nombre de pampas. En general la superficie de estas pampas se inclinan de noroeste a suroeste, variando su altitud entre los 1 000 y 300 metros sobre el nivel del mar.

3.1.1.4 Cono Aluvial

El material de característica natural y antropico ha sido transportado por el río Locumba desde las partes altas de los flancos andinos y depositados, en la superficie de depresión costanera.

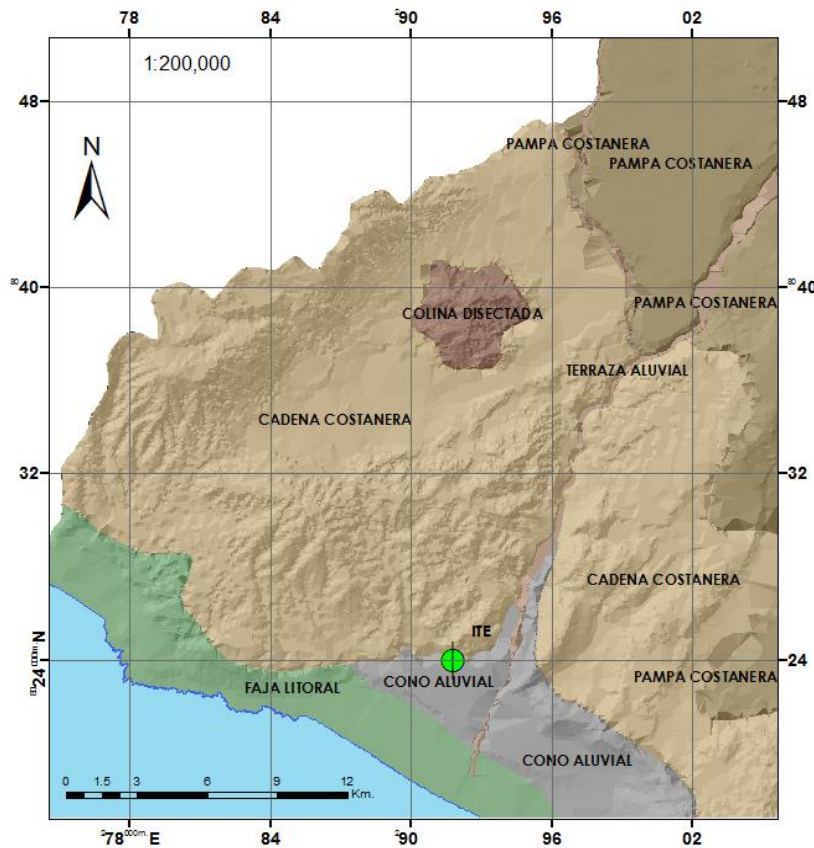


Figura 2. Unidades Geomorfológicas

3.1.2 Geomorfología Local

La zona de estudio muestra una topografía irregular; presentando en un primer plano una llanura de arenas dispuestas, en forma paralela a la línea de la costa, así como la acumulación de relaves sedimentados en la zona de bahía de Ite. Luego se presenta una primera plataforma sedimentaria o terraza, formada por material aluvial. Seguidamente se presenta una planicie aprovechada por los pobladores para la agricultura. Luego se presenta la segunda plataforma sedimentaria o terraza, que está constituida por depósitos fluviales. Para concluir en una segunda planicie agrícola; alrededor encontramos elevaciones y cerros de gran alcance, que le dan la forma de valle a este distrito.

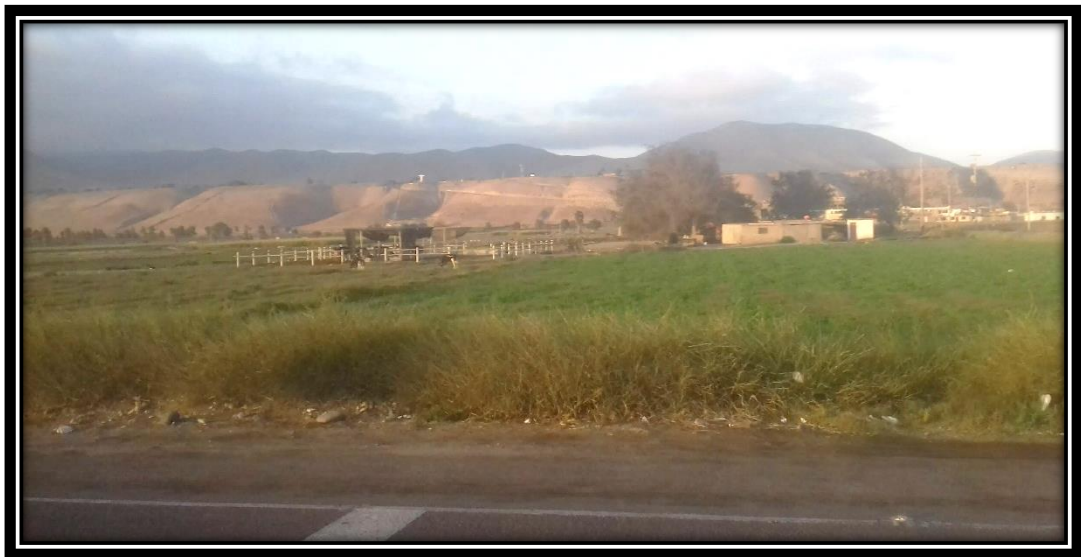


Figura 3. Geomorfología de la zona de estudio

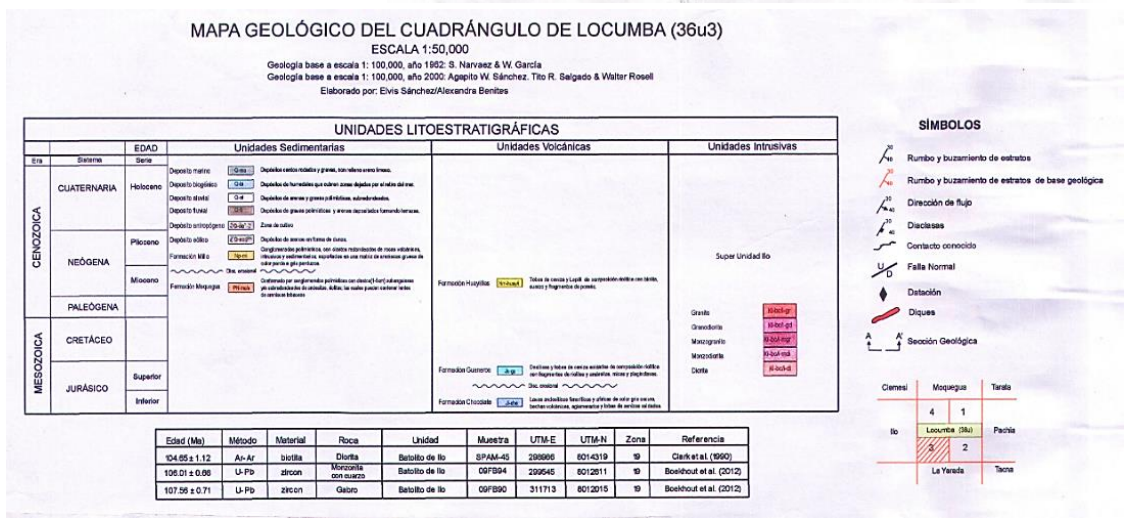
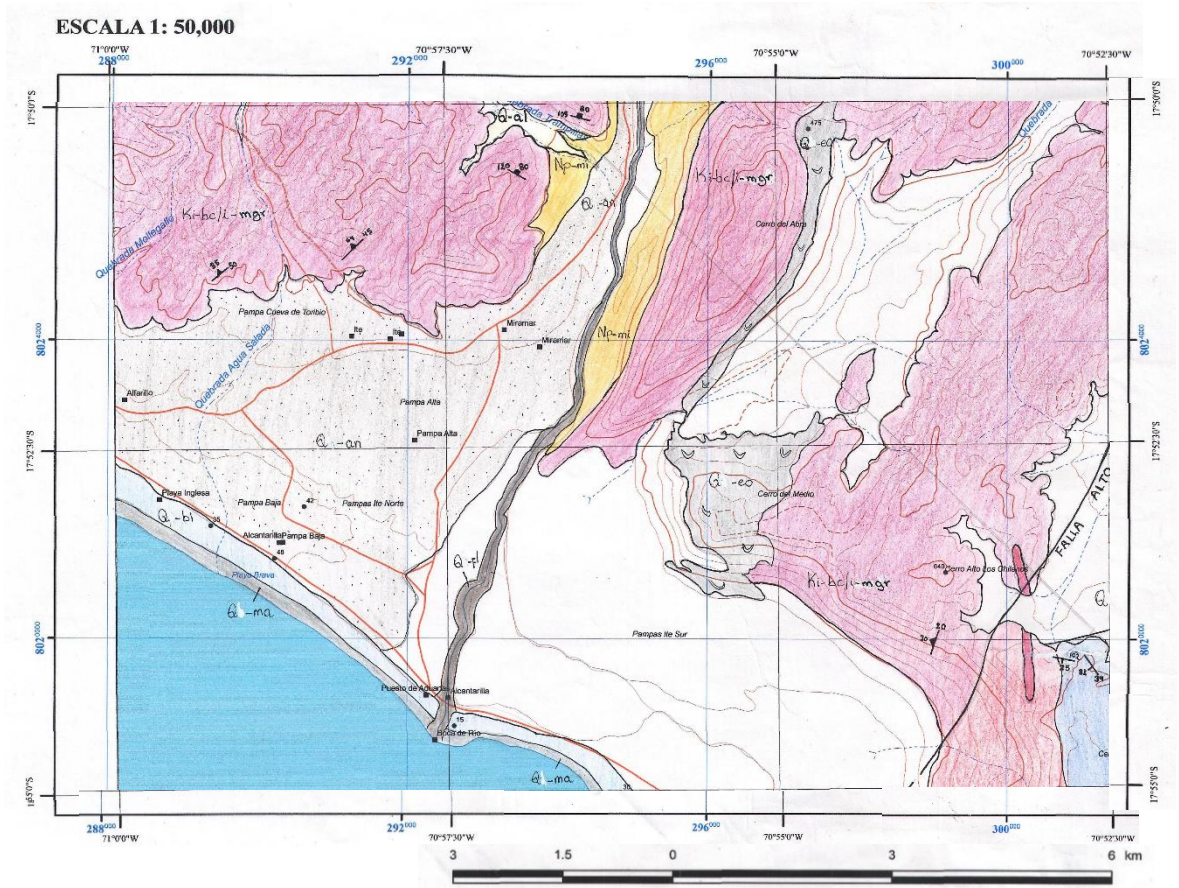


Figura 4. Mapa Geológico de la zona de estudio

3.2 Geología

La siguiente información ha sido extraída de la información publicada por el INGEMMET en sus cuadrángulos geológicos de Ilo y Locumba (36u3), en el cual se detallan las siguientes formaciones. (Narvaez, 1964, p.23-41).

3.2.1 Geología Regional

En la zona de estudio, encontramos las siguientes formaciones geológicas, según detalle:

3.2.1.1 Volcánico Chocolate

Compuesto principalmente por derrames de andesita, dacita y basaltos de textura afanítica a porfiritica y en parte brechoide, ocasionalmente se observan lavas vesiculares rellenas con amígdalas de cuarzo. la formación volcánica del área de Ilo y Locumba se puede correlacionar con el Volcánico Chocolate de Arequipa y, por tanto, son de edad Jurásica Inferior, probablemente del Lias superior.

3.2.1.2 Formación Toquepala

Con este nombre se conoce a una parte de las rocas volcánicas del grupo Toquepala que afloran en la parte media y baja del frente andino del

Sur del Perú. Grandes extensiones de estas rocas se encuentran en los cuadrángulos adyacentes de Pachía, Tarata y Moquegua. Los derrames volcánicos se presentan estratificados en bancos de 1 a 2 metros, con rumbo promedio N - S y buzamientos de 25° a 30° hacia el Oeste, alcanzando un grosor de 150 metros. (Narvaez, 1964, p.30)

3.2.1.3 Formación Moquegua

En los Cuadrángulos de Ilo y Locumba las rocas de la formación Moquegua ocupan casi la mitad de su superficie, extendiéndose desde la Cordillera de la Costa hasta los flancos andinos. En la misma rampa estas rocas se encuentran cubiertas parcialmente por los depósitos aluviales del Cuaternario. La formación Moquegua ha sido dividida de acuerdo a su litología en dos miembros: inferior y superior, los cuales están separados por una suave discordancia paralela de carácter regional.

3.2.1.4 Formación Huaylillas

En el área de Locumba la formación Huaylillas está representada principalmente por tobas blancas riolíticas semicompactadas, compuestas por granos de cuarzo y laminillas de biotita dentro de una matriz de feldespatos descompuestos.

3.2.1.5 Depósitos cuaternarios constituidos por aluviales, fluviales, tecnógenos, etc.

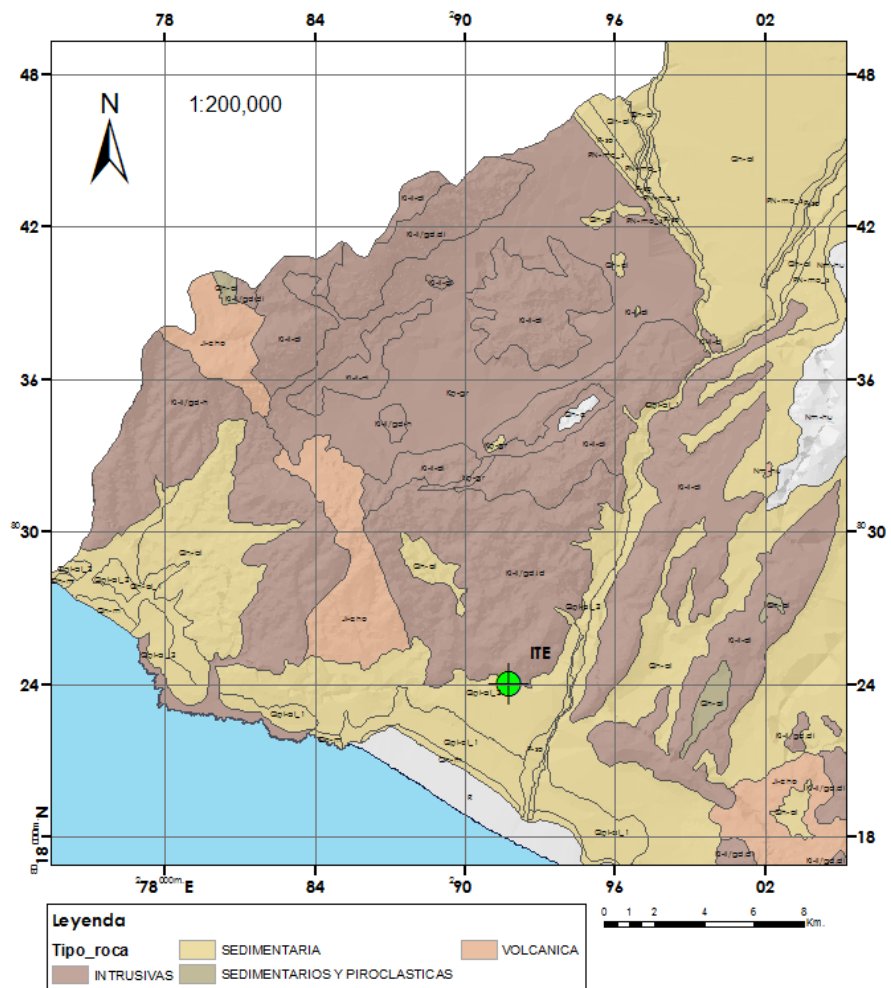


Figura 5. Formaciones Geológicas

3.2.2 Geología Local

En la zona de estudio, encontramos las siguientes características, más sobresalientes:

3.2.2.1 Depósitos aluviales

El material de estos depósitos consiste de gravas semiconsolidadas con intercalaciones lenticulares de arena gruesa, arcilla y tobas redepositados, que muestran una vaga estratificación más o menos horizontal. Las gravas están compuestas por elementos redondeados, subredondeados hasta angulosos, de distintas clases de rocas, predominando los volcánicos. Sus diámetros varían entre 1 y 25 centímetros; en pequeña proporción se observan cantos mayores hasta de 60 centímetros de tamaño.

El material de estos depósitos ha sido transportado por aguas corrientes desde las partes altas de los flancos andinos y depositados en forma de abanicos aluviales de piedemonte, en la superficie de la depresión costanera.

3.2.2.2 Depósitos tecnógenos

Son formaciones superficiales, generadas por actividades geológicas humanas, en éste caso se ha realizado el movimiento y traslado

de las arenas limosas y la acumulación de relaves sedimentados, producto de la actividad minera por más de 50 años que se ha venido realizando en la zona. Este depósito, alcanza en la parte baja de los humedales de Ite, espesores mayores a 2,00 m.

3.2.2.3 Depósitos fluviales

Con esta denominación se considera a los depósitos actuales del fondo del Rio Locumba. El material consiste de gravas con lentes de arenas y capas de arcillas que son aprovechados como terrenos de cultivo.

CAPÍTULO IV

MARCO TEÓRICO

4.1 Antecedentes del estudio

Haciendo una revisión de la bibliografía podemos decir que al menos 150 países o tal vez más, se han visto afectados por este fenómeno, en muchos de los casos por la extracción de agua, a continuación, citaremos algunos casos y autores.

Chai et al. (2004) afirma: “En China el fenómeno de subsidencia se presenta en varias zonas, reportando una subsidencia del terreno de 2-3 metros en el área central de Shanghai debido a la explotación neta de 113 millones de m³ de agua subterránea en el periodo 1990 – 2001” (p.147).

Xue et al. (2005) “La subsidencia en China ocurre en diferentes regiones. Esta es causada principalmente por la extracción excesiva de agua subterránea. Otras razones para la subsidencia incluyen el aceite, la extracción de agua subterránea caliente y el movimiento neotectónico. Las características comunes de la subsidencia de la tierra en China son propiedades lentas, acumulativas, irreversibles y otras propiedades únicas” (p.713).

“En Taiwán, a partir de la década del 70 se inició la explotación de acuíferos con destino a la actividad acuícola principalmente, dando como resultado subsidencia del terreno, no obstante, las políticas y restricciones impuestas por el gobierno” (Chou & Ting, 2007, p.259).

Johnson (2005) afirma: “la subsidencia del terreno ocurrida naturalmente debido a la disolución de evaporitas, roca sedimentaria de precipitación química presente en cerca del 35-40% del territorio estadounidense.” (p.395).

El valle de Kashmar (Irán) es una zona semiárida afectada por subsidencia del terreno con tasas que superan los 15-30 cm/año, debida principalmente a la explotación de acuíferos para la irrigación, que supera los 53 billones de m³ en el período 2002-2003, con una disponibilidad per cápita de menos de 2 000 m³. (Anderssohn et al., 2008, p.287).

La subsidencia de la ciudad en Shanghái fue la primera reportada en 1921. Para 1965, la acumulación máxima de subsidencia fue de 2.63m. La inyección de agua de río a través de los pozos de recarga de los principales acuíferos comenzó alrededor de 1964, para 1966 más de 100 plantas industriales operaban cerca de 200 pozos y se habían unido en la operación de recarga para aumentar la presión en los sistemas de acuíferos

confinados, el cese de la subsidencia fue virtualmente instantáneo en uno o dos años. (TEAM, 1973, p.155).

La Torre de Pisa, cuya construcción fue iniciada en 1174, empezó a ladearse al construirse la tercera galería de las ocho que tiene la estructura. Los trabajos se interrumpieron para modificar planos y luego continuaron, para ser terminada la torre de 55 m de alto en el año 1350. En 1910 ya la torre tenía en su parte más alta un desplome de 5.0 m. Una investigación del subsuelo indicó que la torre fue cimentada por medio de una corona de concreto sobre una capa de arena de 11.00 m de espesor, la cual descansa sobre una capa de arcilla de 8.00 m de grueso, que se ha ido consolidando gradualmente debido a las presiones transmitidas por la estructura. Hoy en día es más conocida como la "Torre Inclinada de Pisa".

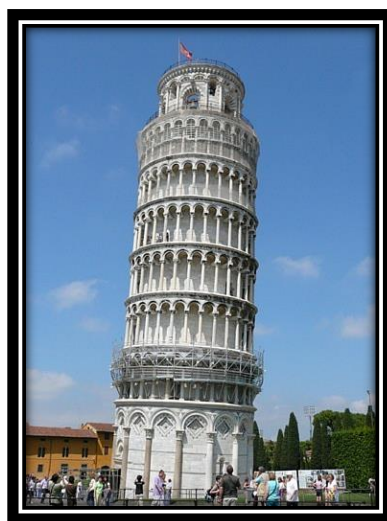


Figura 6. Torre de Pisa (Subsidencia por carga)

Según Tessitore (2014), realiza un resumen de referencias de subsidencia en el mundo. La cual se aprecia a continuación.

Tabla 1.

Historia de los casos de subsidencia

Mexico City	Po river delta	Venice	Tokyo
Figueroa and Germán, 1977	Schrefler et al., 1977	Gambolati and Freeze, 1973	Ricceri and Butterfield, 1974
Carbognin et al., 1978	Carbognin et al., 1978	Ricceri and Butterfield, 1974	Butterfield, 1974
Scott, 1979	UNESCO, 1984	Bouwer, 1977	Bouwer, 1977
UNESCO, 1984	Placzek, 1989	Carbognin et al., 1977	Ishii et al., 1977
Placzek, 1989	Ricceri and Favareti, 1992	Carbognin et al., 1978	Carbognin et al., 1978
		Carbognin et al., 1979	Scott, 1979
Birkle and Schneider, 1998	Lewis and Schrefler, 1998	Corapcioglu, 1984	
Strozzi and Wegmüller, 1999	Gambolati et al., 1999	UNESCO, 1984	Corapcioglu, 1984
	Bitelli et al., 2000	Placzek, 1989	UNESCO, 1984
	Carminati and Martinelli, 2002	Ricceri and Favareti, 1992	Akagi, 1992
	Teatini, 2011	Lewis and Schrefler, 1998	Yamamoto, 1996
		Gambolati et al., 1999	Sato et al., 2003
		Alberotanza et al., 2002	
		Strozzi et al, 2003	
		Teatini, 2005b	
Ravenna	Bangkok	Osaka	Bologna
Carbognin et al., 1979	UNESCO, 1984	Carbognin et al., 1978	Ricceri and Favareti, 1992
UNESCO, 1984	Bergado et al., 1987	UNESCO, 1984	Folloni et al., 1996
Lewis and Schrefler, 1998	Prinzi and Nutalaya, 1987	Akagi, 1992	Wegmüller et al., 1999
Gambolati et al., 1999		Yamamoto, 1996	
Carminati and Martinelli, 2002		Nakagawa et al., 2000	Bitelli et al., 2000
Teatini 2005 a, 2006			Carminati and Martinelli, 2002

Fuente: Estudios de subsidencia tabla tomada de (Tessitore, 2014)

En los años 90, la ciudad de Murcia sufrió el primer caso importante de subsidencia registrado en España debido a un prolongado período de sequía. El descenso experimentado por las aguas freáticas ha influido de

forma notable en el subsuelo y donde asientan las edificaciones provocando deterioros y problemas en edificios, urbanizaciones, instalaciones y obras públicas, originándose un problema que trasciende de lo económico para instalarse en lo social. El descenso experimentado por el nivel piezométrico en Murcia, durante la última sequía, ha ocasionado asientos en el subsuelo que han provocado daños de cierta envergadura, tanto por su dimensión como por su extensión. Se trata del primer caso de subsidencia producido en España. De otros estudios se deduce que el estudio de la subsidencia unidimensional es apropiado para describir el fenómeno. (Vázquez & de Justo Alpañés, 2000, p.251)

4.2 Bases teóricas

4.2.1 Subsidencia

El término genérico de subsidencia hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o submarina. La subsidencia terrestre puede ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas. (Corapcioglu, 1984, p.372)

La subsidencia es un riesgo natural usualmente caracterizado por lentos movimientos de tierra, por esta razón rara vez se convierte en peligro para la vida humana. Sin embargo, esto puede tener varias áreas de interés sobre unos periodos de tiempo, causando deformaciones que pueden

variar de unos pocos milímetros a varios metros. Por lo tanto, si esto afecta áreas metropolitanas puede causar importantes daños estructurales e infraestructurales con altos costos consecuentes. (Tessitore, 2014, p.2)

Tomás et al. (2009) afirman: “La subsidencia del terreno es un fenómeno consistente en el hundimiento de la superficie terrestre cuyo origen puede deberse a diversas causas generando cuantiosos daños en aquellas infraestructuras que se asientan sobre ella” (p.302).

Prokopovich (1979) afirma: “La subsidencia del terreno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos Sub-superficiales de deformación” (p.389).

Martínez (2007), afirma que: “El fenómeno que tiene lugar debido a la extracción de sólidos (minerales) o fluidos (gas, petróleo, vapor, agua, etc.) del subsuelo, que se manifiesta en hundimientos paulatinos o súbitos de la superficie y en la generación de Agrietamientos en la masa del suelo”.

4.2.2 Tipos de subsidencia

La subsidencia se puede clasificar, de acuerdo al mecanismo de que la origina, como se indica a continuación:

4.2.2.1 Subsistencia por erosión subterránea

La subsidencia por erosión subterránea se produce por un proceso mecánico de arrastre de partículas de suelo causado por el flujo de agua subterránea. El agua, en su recorrido horizontal por el terreno, moviliza partículas de suelo generando una serie de canales que pueden desencadenar colapsos del terreno. El fenómeno es conocido como tubificación o “piping”. (Tomás et al., 2009, p.297)

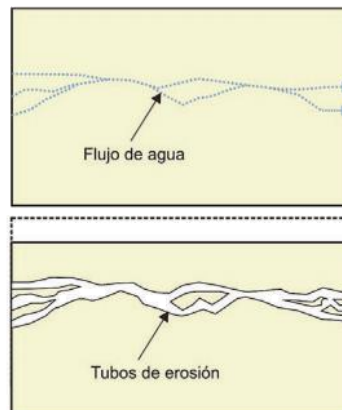


Figura 7. Subsistencia por erosión subterránea.

Fuente: (Tomás et al. 2009)

4.2.2.2 Subsistencia por extracción de fluidos.

La extracción de fluidos (agua, gas o petróleo) desde el terreno puede causar importantes valores de subsidencia como consecuencia del cierre gradual de los huecos rellenos por el fluido extraído. La subsidencia causada por extracción de agua desde el subsuelo afecta a importantes

ciudades como México D.F., Venecia, Valle de San Joaquín (EE.UU.), Taipei (Taiwán), Tokio (Japón), Pekín (China). (Tomás et al., 2009, p.297)

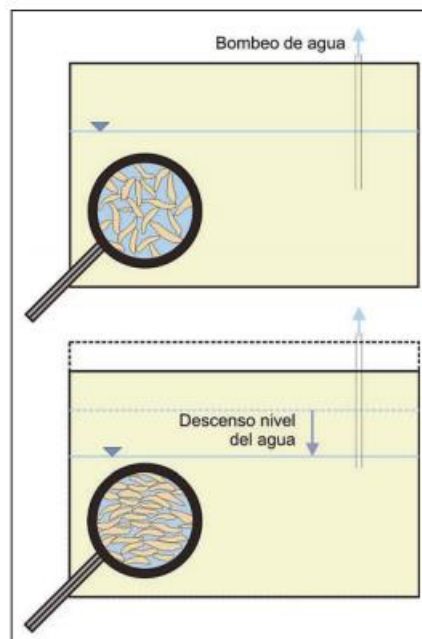


Figura 8. Subsidencia por extracción de fluidos.

Fuente: (Tomás et al. 2009)

4.2.2.3 Subsidencia por disolución subterránea en sal, yeso o rocas carbonáticas

El cloruro sódico (NaCl) es uno de los materiales más solubles de la corteza terrestre. Otros materiales como el yeso y las rocas carbonáticas son también solubles en agua bajo determinadas condiciones pudiendo llegar a generar grandes sistemas de huecos interconectados entre sí cuya

deformación y colapso, en caso extremo, generan una subsidencia con un carácter localizado. (Tomás et al., 2009, p.296)

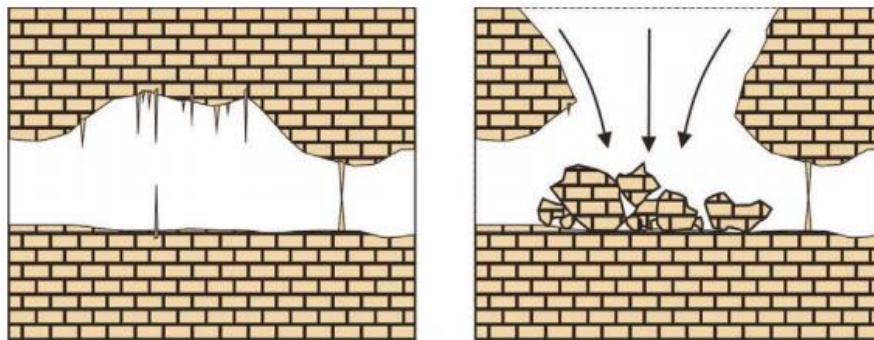


Figura 9. Subsidencia por disolución subterránea en sal, yeso o rocas carbonáticas

Fuente: (Tomás et al. 2009)

4.2.2.4 Subsidencia tectónica

Organización de las Naciones Unidas para la Educación (UNESCO, 1984), afirma: “Durante algunos eventos sísmicos de gran importancia (Hegben Lake, 1959; Chile, 1960; Alaska, 1960), se han medido notables desplazamientos verticales que afectan áreas de cientos de kilómetros cuadrados” (p.139).

Los descensos de la superficie terrestre producidos por las fallas producen un efecto conocido como subsidencia tectónica. Este tipo de subsidencia es, en general, muy lenta y de pequeña magnitud (de pocos

mm o décimas de mm al año) frente a otros tipos de subsidencia. (Tomás et al., 2009, p.298)

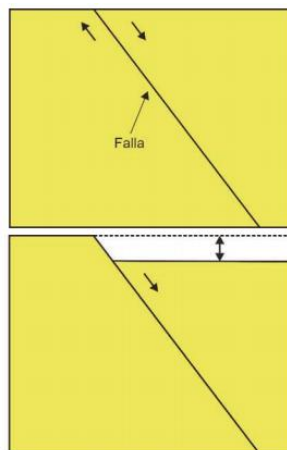


Figura 10. Subsidencia tectónica

Fuente: (Tomás et al. 2009)

4.2.2.5 Subsidencia por efecto de la minería

La subsidencia minera o por construcción de obras subterráneas consiste en el hundimiento de la superficie del terreno con motivo de la deformación y/o colapso de galerías generadas para la extracción de minerales o la construcción de túneles respectivamente. Al intentar ocupar el suelo el vacío generado los terrenos circundantes. Un ejemplo de subsidencia minera en España es el del Municipio de la Unión (Murcia) Otro caso con una alta repercusión mediática es el del túnel del Carmel (Barcelona) que originó un colapso que encadenó el hundimiento de diversas viviendas. (Tomás et al., 2009, p.296)

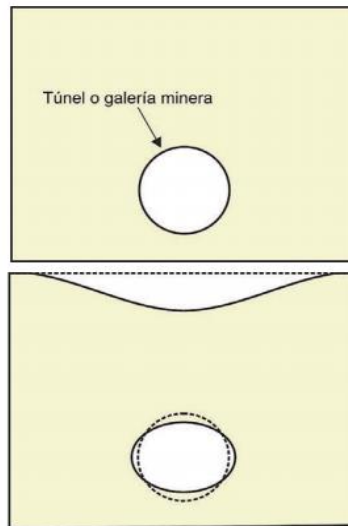


Figura 11. Subsidencia por efecto de la minería

Fuente: (Tomás et al. 2009)

4.2.2.6 Subsidencia por hidrocompactación

La hidrocompactación puede causar asentamientos de la superficie terrestre comprendidos entre 1 a 5 m. Este fenómeno consiste en el asentamiento que se produce en determinados tipos de suelos, con un bajo contenido de humedad y situados sobre el nivel freático, al ser saturados. La presencia de agua puede causar dos tipos de efectos en este tipo de suelos, la disolución de los enlaces entre partículas o la pérdida de las tensiones capilares que en ambos casos sostienen las partículas de suelo para configurar su estructura. En España existen suelos limosos susceptibles de sufrir este efecto en la zona de Levante y en el valle del Ebro. (Tomás et al., 2009, p.298)

4.2.2.7 Subsistencia por vibraciones.

“Las vibraciones producidas por los terremotos, explosiones u otras causas pueden causar la densificación de terrenos granulares sueltos por reajuste de partículas al alcanzar éste una estructura más compacta” (Tomás et al., 2009, p.297).

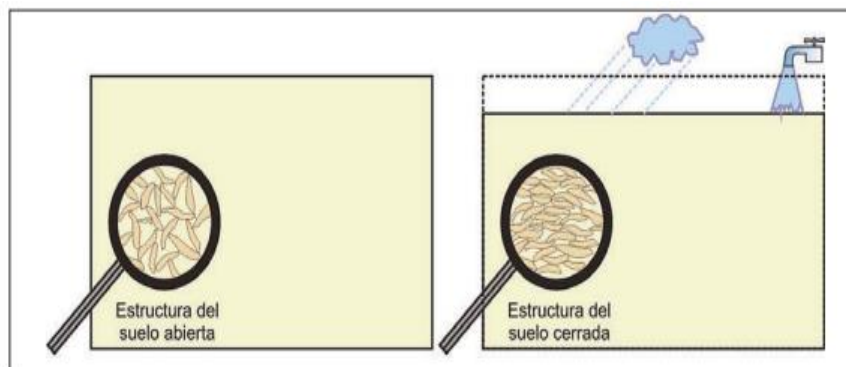


Figura 12. Subsistencia por hidrompactación

Fuente: (Tomás et al. 2009)

4.2.2.8 Subsistencia por flujo lateral en materiales salinos y arcillas plásticas

“En torno a diversas formaciones evaporíticas se producen fenómenos de subsistencia asociados a la actividad diapírica. Este tipo de fenómenos de flujo lateral se ha observado en materiales arcillosos intercalados entre materiales más competentes como pizarras” (Tomás et al., 2009, p.297).

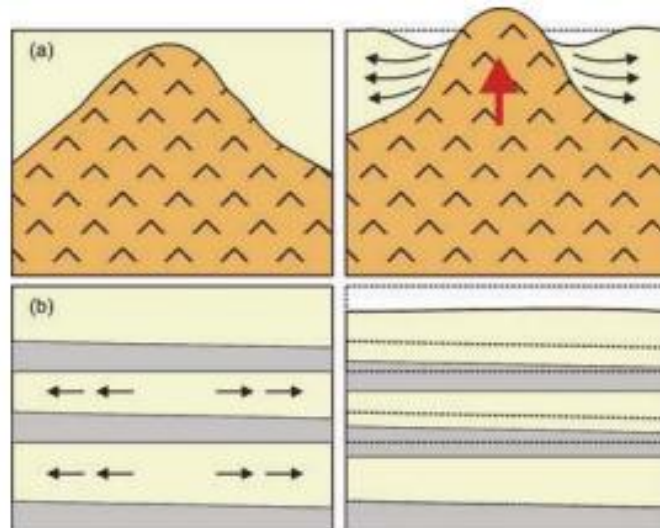


Figura 13. Subsistencia por flujo lateral en materiales salinos y arcillas plásticas

Fuente: (Tomás et al. 2009)

4.2.2.9 Subsistencia por carga

“La acumulación natural sucesiva de sedimentos o determinados tipos de cimentaciones pueden ocasionar la **consolidación del terreno** como consecuencia del peso que ejercen los sedimentos o las construcciones. Esta subsistencia se produce por una reducción gradual de los huecos del suelo” (Tomás et al., 2009, p.297).

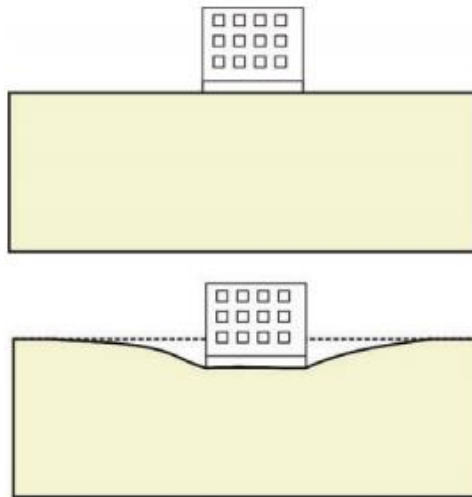


Figura 14. Subsistencia por carga

Fuente: (Tomás et al. 2009)

4.2.3 Consolidación unidimensional de los suelos.

4.2.3.1 Suposiciones establecidas en la teoría de la consolidación unidimensional.

Las suposiciones en que nos basaremos para obtener la ecuación de la consolidación unidimensional son las siguientes:

- a. **Suelo saturado**, se incluye debido a que un suelo parcialmente saturado presenta un comportamiento muy complicado, ya que los gases contenidos permiten deformaciones, aun cuando no exista flujo de agua intersticial. Es por ello en el presente estudio está restringido a estratos compresibles situados bajo el nivel de aguas freáticas.

- b. **Las partículas sólidas y el agua son incompresibles**, considerando que para los esfuerzos a los que normalmente se somete a los suelos, las partículas sólidas y el agua intersticial se comportan como incompresibles.
- c. **Validez de la ley de Darcy**. Es uno de los más acorde a la realidad, ya que ha sido demostrado.
- d. **El coeficiente de permeabilidad del suelo (K) es constante**, en caso de que se presente un suelo heterogéneo, puede optarse por dividirlo en varias capas, cada uno con permeabilidad constante.
- e. **El coeficiente de compresibilidad del suelo, A_v , es constante**, esta es un supuesto, ya que difiere de la realidad y es la que restringe la aplicación de la teoría a estratos en los que la deformación horizontal es pequeña en relación a la deformación vertical.

4.2.3.2 Deducción de la ecuación de la consolidación unidimensional

Teniendo en consideración que estamos frente a un suelo saturado y que las partículas sólidas y el agua son incompresibles, se puede deducir que el cambio de volumen producido por la expulsión de agua, debe ser igual al cambio de volumen de vacíos.

Es por ello que el cambio de volumen debido a la expulsión del agua, tomaremos un prisma rectangular de suelo infinitamente pequeño de dimensiones dx , dy , dz , como el que se muestra en la siguiente figura.

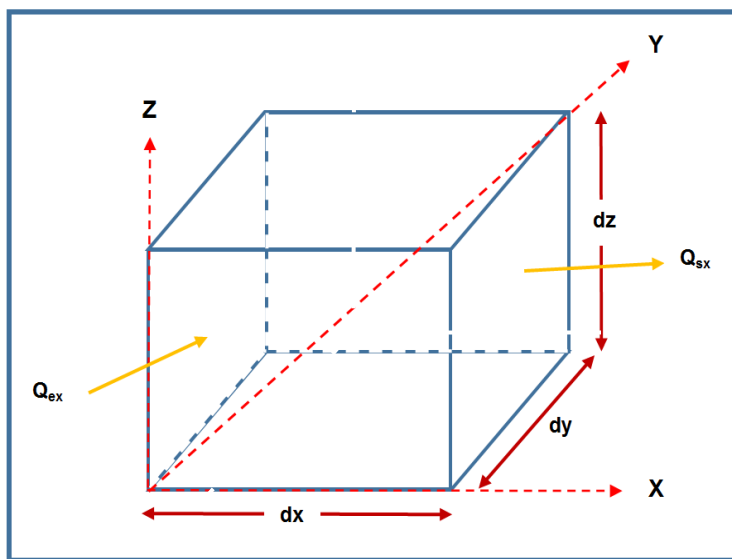


Figura 15. Prisma rectangular del suelo infinitamente pequeño

Coloquemos atención al punto de localización en el centro de este elemento. A la componente del gradiente en ese punto, en la dirección X, le llamaremos i_x y puede expresarse así:

$$i_x = \frac{-1}{\gamma_w} \frac{\partial \mu}{\partial X} \quad (1)$$

En la cara yz , que intercepta al origen, la componente del gradiente en la dirección X es:

$$i_{xE} = \frac{1}{\gamma_w} \left(-\frac{\partial \mu}{\partial X} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} \frac{dx}{\partial t} \right) \quad (2)$$

Con la ley de Darcy, el flujo a través de una cara se da con la siguiente ecuación.

$$Q_{xE} = K_x \frac{1}{\gamma_w} \left(-\frac{\partial \mu}{\partial X} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} \frac{dx}{\partial t} \right) dy dz \quad (3)$$

Donde:

K_x = coeficiente de permeabilidad en la dirección X (cm/día)

De forma similar, el gasto de salida en la dirección X, a través de la cara que se encuentra más alejada del origen:

$$Q_{SE} = K_x \frac{1}{\gamma_w} \left(-\frac{\partial \mu}{\partial X} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} \frac{dx}{\partial t} \right) dy dz \quad (4)$$

Por el cambio de volumen en la dirección X, debido a la expulsión de agua, podemos determinar el cambio de volumen debido al desalojo del agua en la dirección Z.

$$\Delta V_X = Q_{EX} - Q_{SX} \quad (5)$$

$$\Delta V_X = \frac{K_X}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} \right) dx dy dz;$$

$$\Delta V_Y = \frac{K_Y}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 \mu}{\partial Y^2} \right) dx dy dz,$$

$$\Delta V_Z = \frac{K_Z}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 \mu}{\partial Z^2} \right) dx dy dz$$

Tomamos las tres ecuaciones y obtenemos la expresión para el cambio total de volumen:

$$\Delta V = \frac{1}{\gamma_w} \left(K_X \frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} + K_Y \frac{\partial^2 \mu}{\partial Y^2} + K_Z \frac{\partial^2 \mu}{\partial Z^2} \right) dx dy dz \quad (6)$$

Por tanto, la variación de vacíos con respecto al tiempo es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{e}{1 + e_0} \right) dx dy dz \quad (7)$$

$$\left(\frac{dx dy dz}{1 + e_0} \right)$$

Igualamos las expresiones anteriores y obtenemos:

$$\frac{1}{\gamma_w} \left(K_X \frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} + K_Y \frac{\partial^2 \mu}{\partial Y^2} + K_Z \frac{\partial^2 \mu}{\partial Z^2} \right) = \left(\frac{e}{1 + e_0} \right) \frac{\partial}{\partial t} \quad (8)$$

Según la ecuación del coeficiente de compresibilidad, se tiene:

$$Av = \frac{\partial e}{\partial \bar{\sigma}} \quad (9)$$

Donde:

Av = Coeficiente de compresibilidad (cm^2/Kg)

e = Relación de vacíos (adimensional)

$\bar{\sigma}$ = Presión efectiva (Kg/cm^2)

Logramos obtener lo siguiente:

$$\left(K_X \frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} + K_Y \frac{\partial^2 \mu}{\partial Y^2} + K_Z \frac{\partial^2 \mu}{\partial Z^2} \right) - \frac{Av \gamma_w}{1 + e_0} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta la ecuación de presiones totales:

$$\sigma = \bar{\sigma} + \mu_n \quad (11)$$

Donde:

$\bar{\sigma}$ = Presión efectiva (Kg/cm^2)

σ = Presión total (Kg/cm^2)

μ_n = Presión del agua intersticial (Kg/cm^2)

Entonces la presión total será:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} + \frac{\partial \mu_n}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = -\frac{\partial \mu}{\partial t} = 0$$

Además, la presión de poros, se puede descomponer en dos términos:

$$\mu_n = \mu_h + \mu \quad (13)$$

Donde

μ_h = Presión hidrostática (Kg/cm²)

μ = Exceso de presión hidrostática (Kg/cm²)

Definimos los coeficientes de consolidación (Cv), considerando las tres direcciones y el coeficiente de disminución volumétrica (Mv), como:

$$Mv = \left(\frac{Av}{1 + e_0} \right) \quad (14)$$

Teniendo:

$$Cv_x = \frac{Kx(1 + e_0)}{Av \gamma_w} = \frac{Kx}{Mv \gamma_w} \quad (15)$$

$$Cv_y = \frac{Ky(1 + e_0)}{Av \gamma_w} = \frac{Ky}{Mv \gamma_w}$$

$$Cv_z = \frac{Kz(1 + e_0)}{Av \gamma_w} = \frac{Kz}{Mv \gamma_w}$$

Simplificando tenemos:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = \left(Cv_x \frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} + Cv_y \frac{\partial^2 \mu}{\partial Y^2} + Cv_z \frac{\partial^2 \mu}{\partial Z^2} \right) \quad (16)$$

La ecuación anterior de la ecuación de consolidación unidimensional de flujo de agua en tres direcciones para un suelo anisótropo, considerando que:

$$K_x = K_y = K_z = K$$

$$Cv_x = Cv_y = Cv_z = Cv$$

La ecuación 16 se transforma en:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = Cv \left(\frac{\partial^2 \mu}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial Z^2} \right) \quad (17)$$

Esta es la ecuación de la consolidación unidimensional con flujo en tres direcciones para un suelo isótropo. Si estamos trabajando con una consolidación unidimensional, podemos suponer que el flujo ocurre en

dirección vertical. Con esta consideración, la ecuación 17 quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = C_v \left(\frac{\partial^2 \mu}{\partial Z^2} \right) \quad (18)$$

Esta sería la ecuación de consolidación unidimensional, suponiendo que el flujo ocurra en una dirección vertical, esta es llamada la **Ecuación de Consolidación Unidimensional de Terzaghi (1923)**, esta nos servirá para resolver las condiciones iniciales y de frontera.

4.2.3.3 Condiciones iniciales y de frontera.

a. Condiciones iniciales

La distribución del exceso de presión hidrostática en el instante que se aplica la carga, se puede representar como una función, esto es:

$$\mu = f(z)$$

b. Condiciones de frontera

Estas difieren de acuerdo al tipo de drenaje que se tenga:

- El estrato desagua por ambas caras

$$\mu = 0 \text{ para } t > 0, z = 0 \text{ y } z = H$$

Esto se debe a que las capas confinantes son suelos relativamente gruesos y el agua debe fluir libremente, sin producirse sobre presiones intersticiales considerables. En este caso usamos el siguiente esquema.

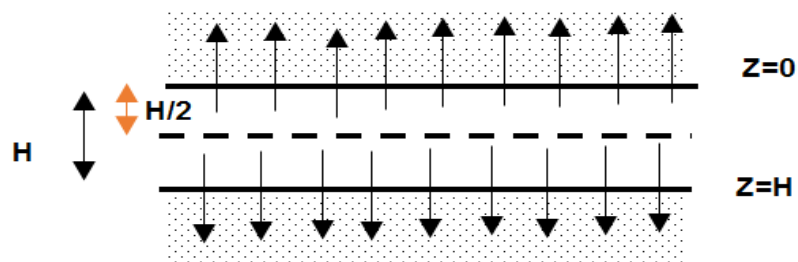


Figura 16. Estrato de drenaje por dos fronteras

- El estrato únicamente drena por la frontera superior

$$\mu = 0 \text{ para } t > 0, z = 0 \text{ y } z = H$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial z} = 0 \text{ para } t > 0, z = 0 \text{ y } z = H$$

Esta última restricción se debe a la base inferior es impermeable y, por tanto, no existe flujo a través de esta frontera, concluyéndose que el gradiente debe ser nulo, esto se aprecia en la figura a continuación.

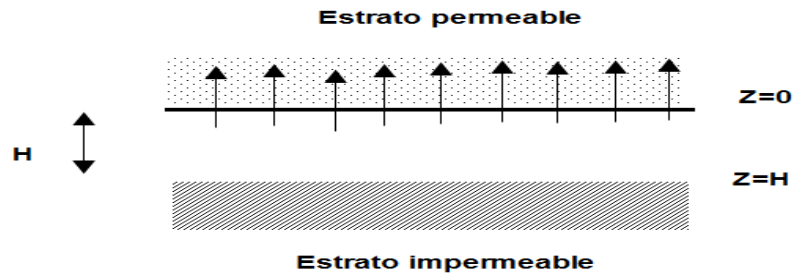


Figura 17. Estrato con drenaje impedido en su frontera inferior

4.2.3.4 Estimación de asentamiento

Para la estimación de los asentamientos, analizaremos los siguientes casos:

- a. Un estrato formado por un estrato compresible, la deformación unitaria multiplicada por el espesor total del estrato compresible nos da la deformación total, que es equivalente a:

$$S = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \quad (19)$$

Donde:

S = asentamiento total (m)

H = espesor total del estrato compresible (m)

Teniendo en cuenta que:

$$Av = \frac{\Delta e}{\Delta P}$$

$$Mv = \frac{Av}{1 + e_0}$$

La ecuación se puede representar de la siguiente forma:

$$S = Mv\overline{\Delta P}H \quad (20)$$

$$dS_t = Mv\overline{\Delta P}dz \quad (21)$$

$$dS_t = Mv(\Delta P - \mu)dz$$

El asentamiento obtenido en la ecuación 20, es la que se obtiene al finalizar el proceso de acreditación. Para poder determinar el asentamiento en un determinado tiempo, tomaremos un diferencial de la ecuación 20, obteniéndose la diferencial de asentamiento.

Debemos integrar desde $Z=0$, hasta $Z=H$, obtenemos el asentamiento S_t , que corresponde a un tiempo posterior t al aplicar la carga, quedando de la siguiente forma:

$$S_t = Mv \int (\Delta P - \mu)dz \quad (22)$$

$$S_t = Mv * \Delta PH - Mv \int_0^H \mu dz$$

La ecuación anterior representa el área bajo el isócrona de exceso de exceso de presión hidrostática correspondiente a un tiempo t, ahora podemos conocer St:

$$\int_0^H \mu dz$$

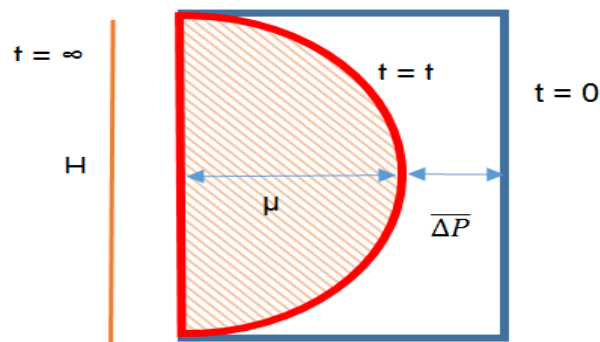


Figura 18. Representación del área de la isócrona de exceso de presión hidrostática en un tiempo t

b. Sistema de varios estratos compresibles.

El asentamiento total, está dado por la suma de los asentamientos totales de cada uno de los estratos.

$$S = \overline{\Delta P} \sum_{i=1}^{Ns} Mv_i H_i \quad (23)$$

Siendo el sub índice i denotado por la propiedad en el i -ésimo estrato N_s . De forma similar el asentamiento a un determinado tiempo t está dado por la siguiente ecuación donde el espesor de i -ésimo estrato compresible.

$$S_t = \Delta P \sum_{i=1}^{N_s} M_{vi} H_i - \sum_{i=1}^{N_s} M_{vi} \int_{H_i} \mu dz \quad (24)$$

4.2.3.5 Grado medio de consolidación

Este término queda representado por la relación de dividir el asentamiento ocurrido en un determinado tiempo t , entre el asentamiento total que ha de producirse, quedando de la siguiente forma: $U = \frac{S_t}{S}$

4.2.4 Ecuación de consolidación unidimensional usando el método de diferencias finitas

Se usa el método de diferencias finitas, haciendo uso del método de Crank Nicolson, el cual nos sirve para resolver la ecuación de consolidación unidimensional con sus condiciones iniciales y de frontera, este se expresa:

$$U_t = C_v \mu_{zz} \quad (25)$$

Donde; μ_t denota derivación parcial con respecto a t , esto es y análogamente tenemos:

$$\mu_t = \frac{\partial \mu}{\partial t}; \mu_{zz} = \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} \quad (26)$$

Si analizamos la ecuación 26, es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, del tipo parabólica, con variables independientes z y t , que tiene como variable dependiente μ .

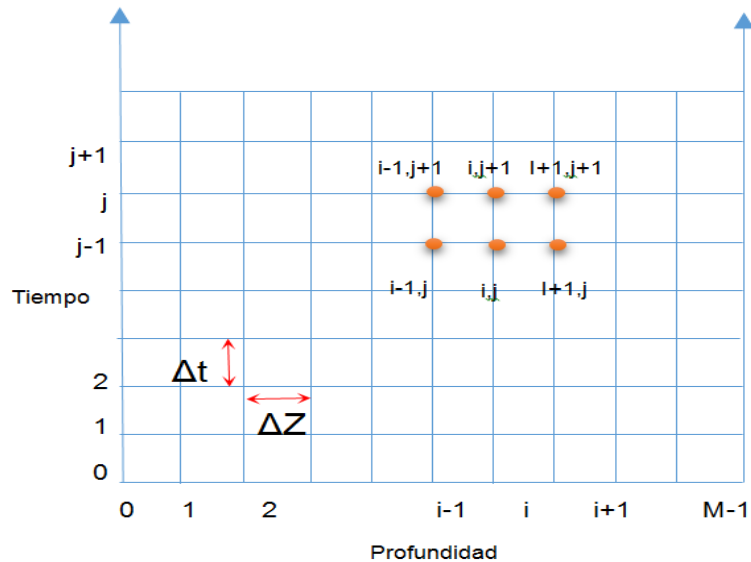


Figura 19. Modelo de discretización continuo

4.2.4.1 Aproximación de las derivadas por diferencias finitas

En cuanto a la serie de Taylor para $\mu(z, t_0)$, con respecto (z_0, t_0) podemos escribirlo como:

$$\begin{aligned}\mu(z, t_0) &= \mu(z_0, t_0) + (z - z_0)\mu_z(z_0, t_0) \\ &\quad + \left(\frac{z - z_0}{2!}\right)^2 \mu_{zz}(z_0, t_0) \\ &\quad + \left(\frac{z - z_0}{3!}\right)^3 \mu_{zzz}(z_0, t_0) + \left(\frac{z - z_0}{4!}\right)^4 \mu_{zzzz}(z_0, t_0) \dots\end{aligned}$$

Tomaremos como base este teorema y podremos obtener la expresión $\mu_{i+1, j}$, con relación al nodo (i, j)

$$\begin{aligned}\mu_{i+1, j} &= \mu_{i, j} + \Delta z \mu_z + \left(\frac{\Delta z}{2!}\right)^2 \mu_{zz} + \left(\frac{\Delta z}{3!}\right)^3 \mu_{zzz} + \left(\frac{\Delta z}{4!}\right)^4 \mu_{zzzz} \\ &\quad + \dots\end{aligned} \tag{27}$$

Todas la derivadas están evaluadas en el nodo (i, j) , es similar al valor $\mu_{i+1, j}$, con referencia al punto i, j , donde todas son igualadas en el nodo (i, j) :

$$\mu_{i-1, j} = \mu_{i, j} - \Delta z \mu_z + \left(\frac{\Delta z}{2!}\right)^2 \mu_{zz} - \left(\frac{\Delta z}{3!}\right)^3 \mu_{zzz} + \left(\frac{\Delta z}{4!}\right)^4 \mu_{zzzz} - \dots \tag{28}$$

Despejamos la ecuación 28 y trabajamos con los primeros términos de la serie, esta ecuación se llama diferencia hacia adelante y determinamos el error por truncamiento;

$$\mu_z \cong \frac{\mu_{i+1,j} - \mu_{i,j}}{\Delta z}, \quad (29)$$

$$ET = -\frac{\Delta z}{2} \mu_{zz}(\varepsilon, j) \quad i \leq \varepsilon \leq i + 1$$

Análogamente, de la ecuación 29, esta ecuación se llama diferencia hacia atrás, error de truncamiento para este caso es:

$$\mu_z \cong \frac{\mu_{i,j} - \mu_{i-1,j}}{\Delta z}, \quad (30)$$

$$ET = -\frac{\Delta z}{2} \mu_{zz}(\varepsilon, j) \quad i - 1 \leq \varepsilon \leq i$$

Si se resta las ecuaciones 29 y 30 y despejamos μ_z , esta se le conoce como diferencia central y resulta, el error de aproximación es:

$$\mu_z \cong \frac{\mu_{i+1,j} - \mu_{i-1,j}}{2\Delta z} \quad (31)$$

$$ET = -\frac{(\Delta z)^2}{6} \mu_{zzz}(\varepsilon, j) \quad i - 1 \leq \varepsilon \leq i + 1$$

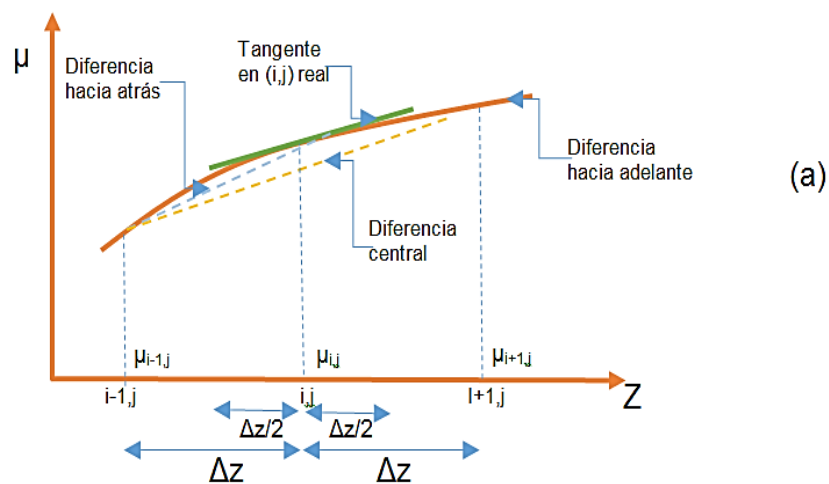
Sumamos las ecuaciones 30 y 31 y obtenemos como resultado, el valor del error es:

$$\mu_{zz} \approx \frac{\mu_{i-1,j} - 2\mu_{i,j} + \mu_{i+1,j}}{(\Delta z)^2} \quad (32)$$

$$ET = -\frac{(\Delta z)^2}{12} \mu_{zzzz}(\varepsilon, j) \quad i-1 \leq \varepsilon \leq i+1 \quad (33)$$

4.2.4.2 Interpretación gráfica de las aproximaciones de las diferencias

Si observamos la ecuación de la diferencia hacia atrás esta se aproxima a la derivada, evaluando en el punto (i,j) , tomando la pendiente ente punto y el punto contiguo anterior $(i-1,j)$, la diferencia hacia adelante aproxima a este mismo valor, pero con la pendiente entre los puntos (i,j) y el siguiente $(i+1,j)$ y la diferencia central se logra del acercamiento formando la pendiente con los puntos $(i-1,j)$ e $(i+1,j)$. Estas consideraciones se muestran en la siguiente Figura 19.



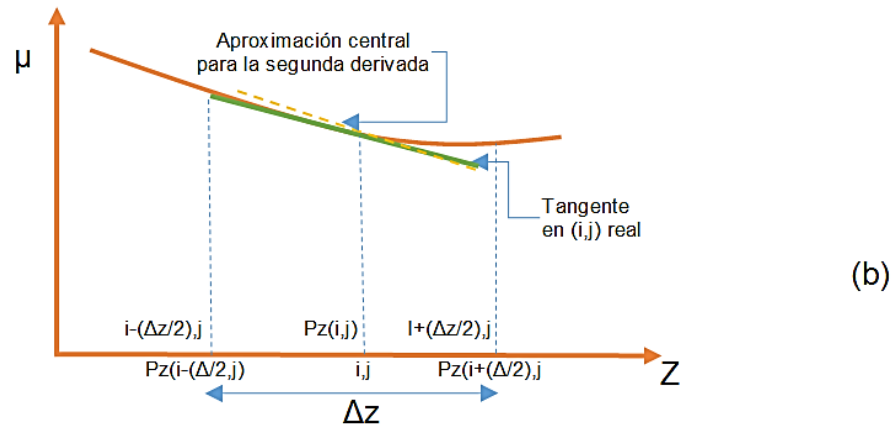


Figura 20. Gráfica de la interpretación de las aproximaciones de diferencias

La curva dibujada en la figura anterior, representa la derivada de la función μ con respecto a z , teniendo esto la ecuación de diferencias para la segunda derivada parcial, esta evaluada en (i,j) , se puede interpretar gráficamente con la pendiente de la función Pz , tomada entre los puntos $(i+1/2,j)$ e $(i-1/2,j)$, donde los valores de la curva, en los puntos señalados se aproxima a la diferencia central, teniendo:

$$Pz_{(i+\frac{1}{2},j)} \approx \frac{\mu_{i+1,j} - \mu_{i,j}}{\Delta z} \quad (34)$$

$$Pz_{(i-\frac{1}{2},j)} \approx \frac{\mu_{i,j} - \mu_{i-1,j}}{\Delta z}$$

Tomando la pendiente entre los dos puntos tenemos:

$$\mu_{zz} \approx \frac{\frac{\mu_{i+1,j} - \mu_{i,j}}{\Delta z} - \frac{\mu_{i,j} - \mu_{i-1,j}}{\Delta z}}{\Delta z} \quad (35)$$

$$\mu_{zz} \approx \frac{\mu_{i-1,j} - 2\mu_{i,j} + \mu_{i+1,j}}{(\Delta z)^2}$$

Que es lo mismo obtener anteriormente, esto lo podemos observar en la figura 19(b).

4.2.5 Método de Crank- Nicholson

Obtuvimos en el punto anterior la aproximación de diferencias finitas para la segunda derivada, evaluada en el punto (i,j), siendo este:

$$\mu_{zz}(i,j) = \frac{\mu_{i-1,j} - 2\mu_{i,j} + \mu_{i+1,j}}{(\Delta z)^2} \quad (36)$$

De forma similar se puede obtener una expresión para esta derivada, evaluando en el punto (i,j+1):

$$\mu_{zz} = \frac{\mu_{i-1,j} - 2\mu_{i,j} + \mu_{i+1,j} + \mu_{i-1,j+1} - 2\mu_{i,j+1} + \mu_{i+1,j+1}}{(\Delta z)^2} \quad (37)$$

Ahora emplearemos una aproximación de diferencias para μ_t hacia adelante:

$$\mu_t = \frac{\mu_{i,j+1} - \mu_{i,j}}{\Delta t} \quad (38)$$

Si tomamos la ecuación 37 y 38, en la ecuación de diferencias finitas tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j+1} - (\lambda + 1)\mu_{i,j+1} + \frac{\lambda}{2}\mu_{i+1,j+1} \\ = -\frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j} - (\lambda + 1)\mu_{i,j} + \frac{\lambda}{2}\mu_{i+1,j} \end{aligned} \quad (39)$$

Donde:

$$\lambda = Cv \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (40)$$

La expresión 40, nos simplifica el método de Crank Nicholson, propuesto en 1947 para resolver las ecuaciones de diferencias parciales de forma $\mu_t = \mu_{zz}$, este método nos servirá para resolver la ecuación de consolidación de Terzaghi.

4.3 Definición de términos

4.3.1 Subsistencia

El término genérico de subsistencia hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o submarina. La subsistencia terrestre, en la cual se centra el presente trabajo, es un fenómeno que

implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas. (Corapcioglu, 1984, p.372)

4.3.2 Consolidación

“Es la reducción gradual de volumen del suelo por compresión debido a la aplicación de cargas estáticas. También puede darse por pérdida de aire o agua, o por un reajuste de la fábrica textural” (Duque & Escobar, 2016, p.139).

4.3.3 Compactación

“Es la densificación del suelo, lograda por medios dinámicos, con el propósito de mejorar sus propiedades ingenieriles” (Duque & Escobar, 2016, p.139).

4.3.4 Teoría de la consolidación (Terzaghi 1925)

Terzaghi (1925), afirma que: Es útil para conocer aproximadamente la ruta de asentamiento de un suelo por cargas aplicadas, con base en el resultado del ensayo de consolidación, tomar en cuenta la siguiente hipótesis:

- Estrato de suelo homogéneo, isótropo y de espesor constante.

- Estrato saturado 100% entre 1 o 2 superficies más permeables.
- Compresibilidad del agua y los granos, despreciable.
- Acciones similares de masas infinitesimales o masas grandes.
- Compresión unidimensional, en dirección normal a la capa de suelo.
- Validez de la Ley de Darcy.
- Valores constantes de las profundidades del suelo (algunas cambian).
- Relación lineal (idealizada) entre relación de vacíos y presión.
- Deformaciones lentas que permitan despreciar las fuerzas de inercia.

CAPÍTULO V

MARCO METODOLÓGICO

5.1 Procesamiento y análisis de datos

5.1.1 Simulación de consolidación unidimensional para un estrato compresible

Para generar la simulación se empleó el método de diferencias finitas de Crank-Nicholson, en este caso simularemos la consolidación unidimensional con flujo de agua vertical, para un estrato compresible. Primero lo realizaremos de forma general y luego utilizaremos datos de campo.

La ecuación que gobierna el proceso de consolidación unidimensional.

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} \quad (41)$$

Debemos tener en cuenta los siguientes requisitos:

a. Condición inicial

$$\mu = f(z) \quad \text{para } t = 0 \text{ y } 0 < z < H$$

Esto debido al tipo de drenaje que tenga, Esto se debe a que las capas confinantes son suelos relativamente gruesos y el agua debe fluir libremente, sin producirse sobre presiones intersticiales considerables.

b. Condición de frontera

El estrato únicamente drena por la frontera superior

$$\mu = 0 \text{ en } z = 0 \quad \text{para } t > 0$$

$$\mu = 0 \text{ en } z = H$$

Esta última restricción se debe a la base inferior es impermeable y, por tanto, no existe flujo a través de esta frontera, concluyéndose que el gradiente debe ser nulo.

5.1.1.1 Modelo propuesto

La discretización, se da cuando el espesor total del estrato compresible H, sea dividido en M intervalos iguales de tamaño Δz ; esto con respecto al tiempo, se divide en cuantas partes sea necesario, cada uno en una longitud Δt .

La expresión discretizada inicial, se dedujo así:

$$\frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j+1} - (\lambda + 1)\mu_{i-1,j+1} + \frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j+1} = \frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j+1} + (\lambda - 1)\mu_{i-1,j+1} - \frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j+1}$$

Entonces las condiciones iniciales y de frontera serán:

$$\begin{aligned} \mu_{i,0} &= f(z) && \text{para } i = 0, 1, \dots && (42) \\ \mu_{0,j} &= 0 && \text{para } j > 0 \\ \mu_{M,j} &= 0 \end{aligned}$$

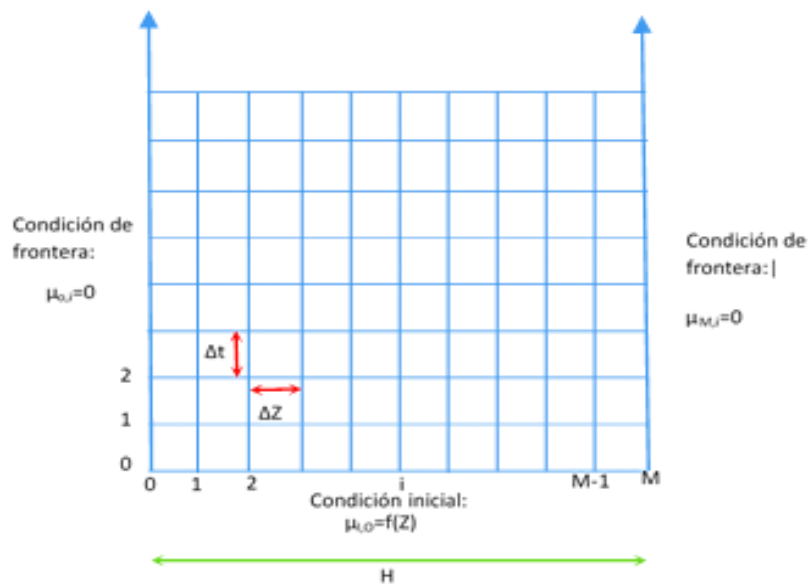


Figura 21. Modelo de discretización del estrato

5.1.1.2 Solución numérica

Si en la ecuación inicial, hacemos $j = 0$ y realizamos un recorrido de los puntos $i = 1$ a $i = M-1$, tomando las ecuaciones anteriores, podemos escribir las ecuaciones en la línea en el tiempo.

$$(1 + \lambda)\mu_{1,1} - \frac{\lambda}{2}\mu_{2,1} = (1 - \lambda)\mu_{1,0} + \frac{\lambda}{2}(\mu_{0,1} + \mu_{0,0} + \mu_{2,0}) \quad (43)$$

$$\begin{aligned}
-\frac{\lambda}{2}\mu_{1,1} + (1 + \lambda)\mu_{2,1} - \frac{\lambda}{2}\mu_{3,1} &= (1 - \lambda)\mu_{2,0} + \frac{\lambda}{2}(\mu_{1,0} + \mu_{3,0}) \\
-\frac{\lambda}{2}\mu_{2,1} + (1 + \lambda)\mu_{3,1} - \frac{\lambda}{2}\mu_{4,1} &= (1 - \lambda)\mu_{3,0} + \frac{\lambda}{2}(\mu_{2,0} + \mu_{4,0}) \\
&\dots\dots \\
-\frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,1} + (1 + \lambda)\mu_{i,j} - \frac{\lambda}{2}\mu_{i+1,1} &= (1 - \lambda)\mu_{i,0} + \frac{\lambda}{2}(\mu_{i-1,0} + \mu_{i+1,0}) \\
&\dots\dots \\
-\frac{\lambda}{2}\mu_{M-3,1} + (1 + \lambda)\mu_{M-2,1} - \frac{\lambda}{2}\mu_{M-1,1} \\
&= (1 - \lambda)\mu_{M-2,0} + \frac{\lambda}{2}(\mu_{M-3,0} + \mu_{M-1,0}) \\
-\frac{\lambda}{2}\mu_{M-2,1} + (1 + \lambda)\mu_{M-1,1} - \frac{\lambda}{2}\mu_{M,1} \\
&= (1 - \lambda)\mu_{M-1,0} + \frac{\lambda}{2}(\mu_{M-2,0} + \mu_{M,0})
\end{aligned}$$

Se tiene ecuaciones lineales simultáneas con M-1 incógnitas, las incógnitas son $\mu_{i,1}$ para $i=1$ a $i=M-1$ y que el sistema se ha escrito dejando a las incógnitas en el lado izquierdo de las igualdades.

Nótese también que es el sistema resultante es tridiagonal, por que los elementos son diferentes a cero. El método utilizado será el Método de eliminación de Gauss, para sistema tridiagonales expuesto en los anexos.

El Método de eliminación de Gauss, se puede expresar de la siguiente forma:

$$b_1\mu_{1,1} + c_1\mu_{2,1} = d_1 \tag{44}$$

$$a_2\mu_{1,1} + b_2\mu_{2,1} + c_2\mu_{3,1} = d_2$$

$$a_3\mu_{2,1} + b_3\mu_{3,1} + c_3\mu_{4,1} = d_3$$

....

$$a_i\mu_{i-1,1} + b_i\mu_{i,1} + c_i\mu_{i+1,1} = d_i$$

....

$$a_{M-2}\mu_{M-3,1} + b_{M-2}\mu_{M-2,1} + c_{M-2}\mu_{M+1} = d_{M-2}$$

$$a_{M-1}\mu_{M-2,1} + b_{M-2}\mu_{M-1,1} = d_{M-1}$$

Donde:

$$b_1 = 1 + \lambda \quad c_1 = -\lambda/2 \quad d_1 = (1 - \lambda)\mu_{1,0} + \lambda/2 (\mu_{0,1} + \mu_{0,0} + \mu_{2,0})$$

$$a_1 = -\lambda/2 \quad b_1 = 1 + \lambda \quad c_1 = -\lambda/2$$

$$d_1 = (1 - \lambda)\mu_{i,0} + \lambda/2 (\mu_{0,1} + \mu_{i-1,0} + \mu_{i+1,0})$$

Para $2 \leq i \leq M-2$

$$a_{M-1} = -\lambda/2 \quad b_{M-1} = 1 + \lambda$$

$$d_{M-1} = (1 - \lambda)\mu_{M-1,0} + \lambda/2 (\mu_{M,1} + \mu_{M-2,0} + \mu_{M,0})$$

Estas ecuaciones se abrevian de la siguiente forma:

$$b_1\mu_{1,1} + c_1\mu_{2,1} = d_1$$

$$a_1\mu_{i-1,1} + b_i\mu_{i,1} + c_i\mu_{i+1,1} = d_i \text{ para } 2 \leq i \leq M - 2$$

$$a_{M-1}\mu_{M-2,1} + b_{M-1,1} = d_{M-1}$$

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones de la primera línea de tiempo, podemos obtener las ecuaciones del segundo nivel, que también resulta de un sistema tridiagonal de M-1, ecuaciones con M-1 incógnitas, resolviendo así la tercera línea de tiempo, así sucesivamente, obteniéndose la variación de la presión de poros con la profundidad y el tiempo.

5.1.1.3 Simulación del modelo

Según el perfil estratigráfico realizado en la zona de estudio en las dos calicatas, se logra observar dos estratos conformados por arenas-limos y arenas arcillosas. Nosotros en esta primera simulación tomaremos que el estrato de arenas arcillosas se encuentra situado frente a dos estratos permeables.

Las ecuaciones que definen el proceso de consolidación para este estrato son las presentadas en el capítulo anterior, pero debemos de tener en cuenta lo siguiente.

$$\mu_i, \sigma = \Delta P \text{ para } i=1,2, \dots, M-1$$

Para el proceso de simulación usaremos el software Matlab, en anexo podemos observar la codificación del programa.

Los datos para este modelo los tomaremos del ensayo de laboratorio de consolidación, el cual se encuentra en resultados y en el anexo de ensayos de laboratorio.

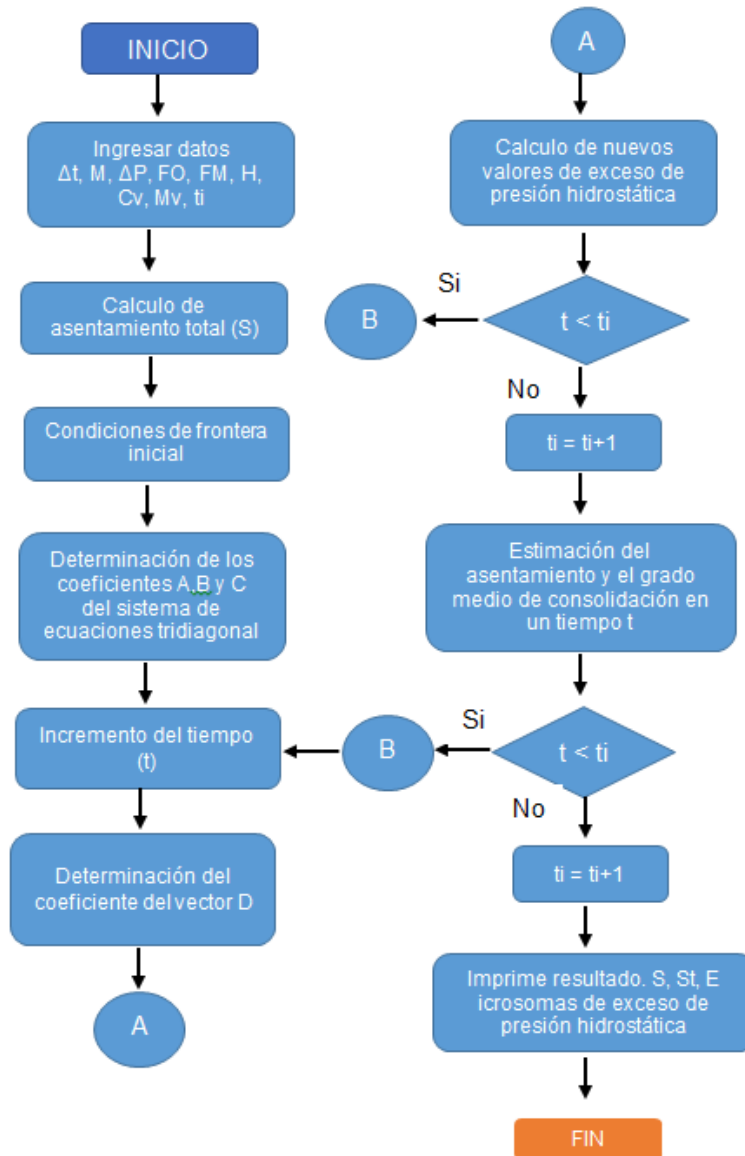
Se tomará los siguientes datos:

Tabla 2.

Datos de simulación para consolidación unidimensional para un estrato compresible

Escenario	T	DP	F0	FM	IT	H	Cv	Mv	K	dz
1	5	0,7	0	0	1	5	1,4522	0,0579	1,6x10 ⁻⁶	0,25

5.1.1.4 Diagrama del modelo de simulación



5.1.2 Simulación de consolidación unidimensional para varios estratos compresibles

El fenómeno de la consolidación unidimensional para el caso de un sistema formado por varios estratos compresibles. Emplearemos el Método de Diferencias Finitas de CRANK – NICHOLSON, y además, para satisfacer las condiciones de frontera interna entre estratos.

La formulación del proceso se hará para un sistema constituido por N_s estratos compresibles, y al final del apartado se resolverá un problema con cuatro capas deformables. La ecuación que rige el proceso de consolidación para un sistema formado por N_s estratos compresibles es:

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial t}\right)_L = CV_L \left(\frac{\partial^2 \mu}{\partial Z^2}\right)_L \quad \text{para } L = 1, 2, \dots, N_s \quad (45)$$

Donde el subíndice L denota la propiedad correspondiente al L -ésimo estrato. Las condiciones iniciales y de frontera externa que deben cumplirse para este sistema de estratos, son las mismas señaladas para el caso de un solo estrato compresible. Además de estas restricciones, deben satisfacerse las condiciones de frontera interna que se presentan en las interfaces de los estratos con diferentes propiedades. Las ecuaciones correspondientes a este requisito las podemos obtener basándonos en la

Ley de Darcy y en la continuidad del flujo a través de las fronteras internas, esto es:

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial Z}\right)_L K_L = \left(\frac{\partial \mu}{\partial Z}\right)_{L+1} K_{L+1} \quad \text{para } L = 1, 2, \dots, N_s - 1 \quad (46)$$

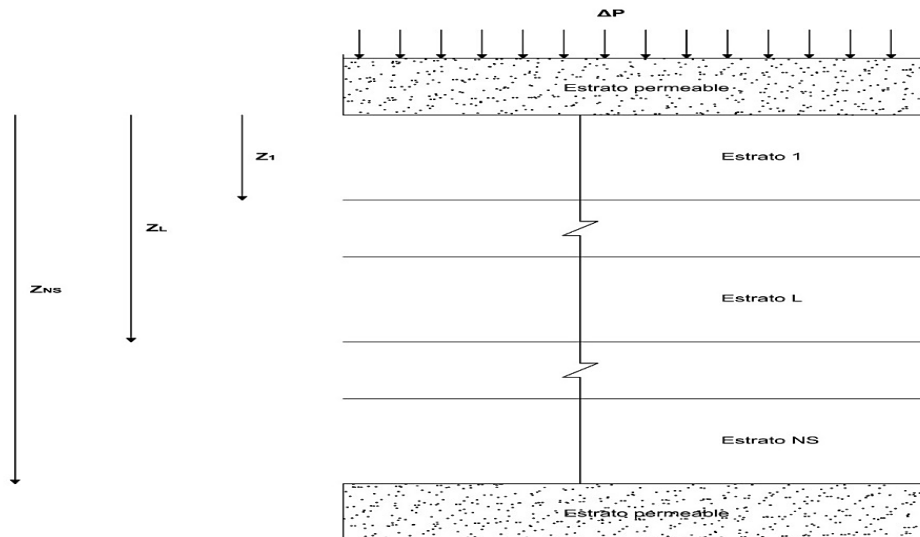


Figura 22. Sistema tomado por \$N_s\$ estratos compresibles

Fuente: Terzaghi (1943)

5.1.2.1 Modelo propuesto

El modelo propuesto para este sistema de estratos es básicamente el mismo planteado para un estrato compresible. Aquí, al espesor total del sistema de estratos se le ha dividido en \$M\$ intervalos iguales de tamaño \$\Delta Z\$; con respecto al tiempo es enteramente igual. El sistema discretizado se presenta en la Figura 22.

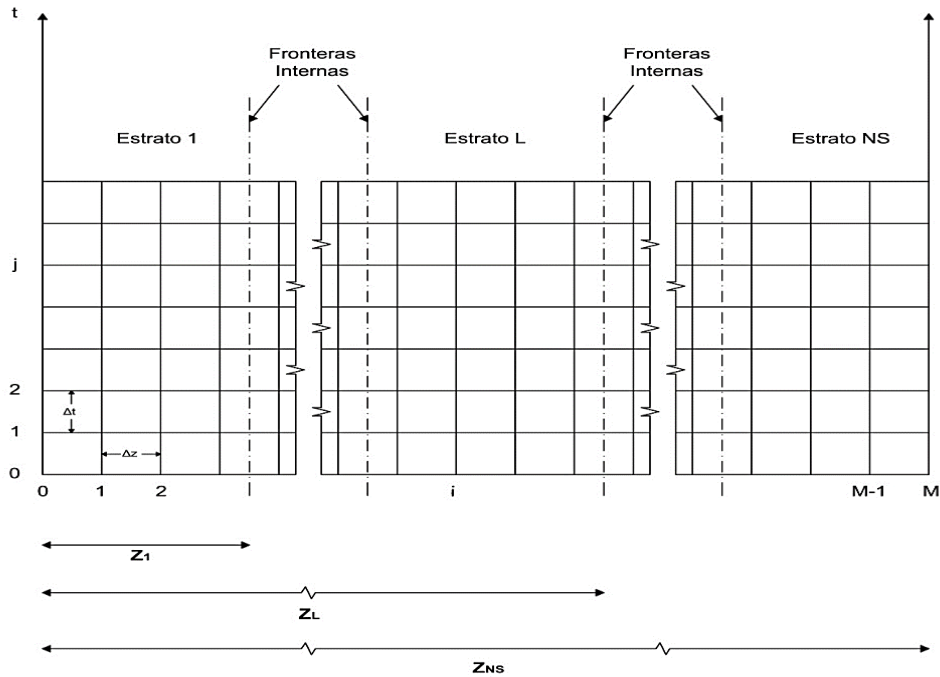


Figura 23. Discretización de un sistema formado por Ns estratos compresible

Fuente: Terzaghi (1943)

Las expresiones discretizadas para la ecuación inicial con las condiciones iniciales y de frontera externa son las mismas que las expuestas anteriormente. Esta ecuación se aplicará a todos los nodos internos de la malla, salvo aquellos puntos que se encuentren separados por una frontera interna.

Condición inicial:

$$\mu_{i,0} = f(Z) \quad \text{para } i = 0,1,2, \dots, M \quad (47)$$

Condiciones de frontera externa:

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{0,j} = 0 \\ \mu_{M,j} = 0 \end{array} \right\} \text{ para } j > 0 \quad (48)$$

Para la discretización de las condiciones de frontera interna, deben hacerse las dos siguientes condiciones:

- a. El punto (i, j) sobre el cual está centrada la ecuación de diferencias, se encuentra situado a la izquierda de una frontera interna.

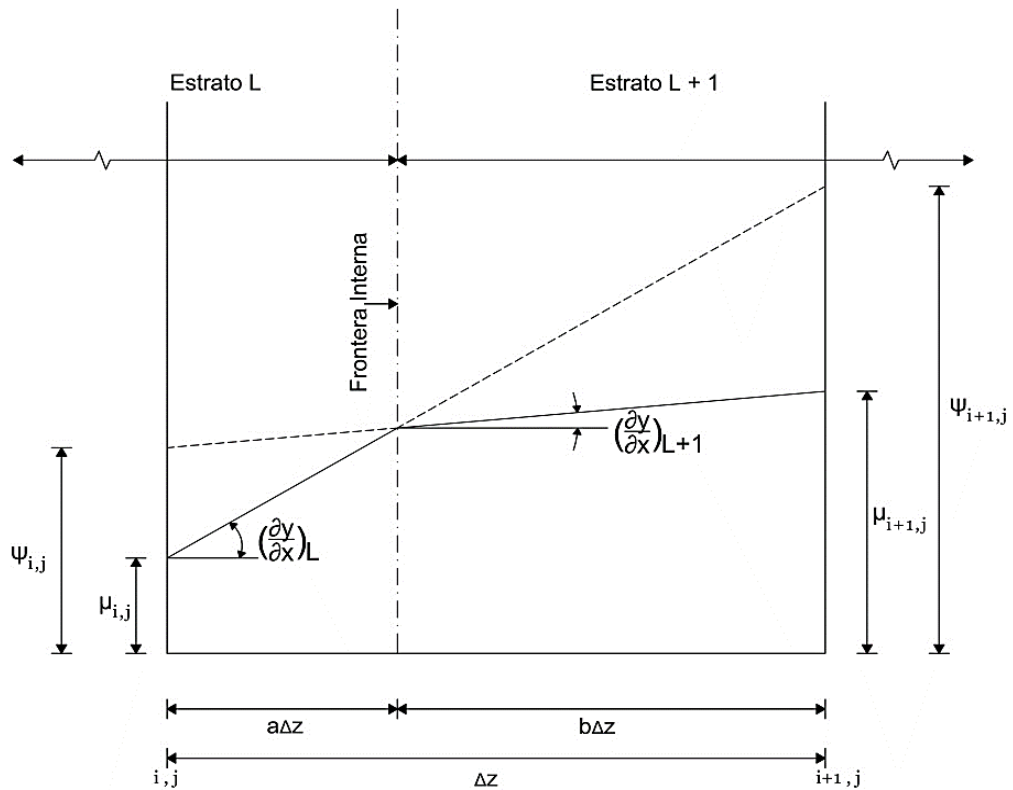


Figura 24. El punto (i, j) , está situado a la izquierda de una frontera interna

Basándonos en la figura 23 podemos obtener las dos siguientes igualdades:

$$\left(\frac{\partial\mu}{\partial Z}\right)_L a\Delta Z + \left(\frac{\partial\mu}{\partial Z}\right)_{L+1} b\Delta Z = \mu_{i+1,i} - \mu_{i,j} \quad (49)$$

$$\psi_{i+1,j} = \mu_{i+1,j} + \left\{ \left(\frac{\partial\mu}{\partial Z}\right)_L - \left(\frac{\partial\mu}{\partial Z}\right)_{L+1} \right\} b\Delta Z$$

Combinando las ecuaciones resulta:

$$\left(\frac{\partial\mu}{\partial Z}\right)_{L+1} = \frac{(\mu_{i+1,j} - \mu_{i,j}) \left(\frac{K_L}{K_{L+1}}\right)}{\left\{ a + b \frac{K_L}{K_{L+1}} \right\} \Delta Z} \quad (50)$$

Introduciendo las ecuaciones anteriores tenemos:

$$\psi_{i+1,j} = \mu_{i+1,j} + R_a(\mu_{i+1,j} - \mu_{i,j}) \quad (51)$$

$$R_a = \frac{b \left(1 - \frac{K_L}{K_{L+1}}\right)}{\left\{ \frac{K_L}{K_{L+1}} + a \left(1 - \frac{K_L}{K_{L+1}}\right) \right\}} \quad (52)$$

Donde:

Igualmente podemos obtener el potencial aparente en el punto (i+1, j+1):

$$\psi_{i+1,j+1} = \mu_{i+1,j+1} + R_a(\mu_{i+1,j+1} - \mu_{i,j+1}) \quad (53)$$

Reemplazando en la ecuación inicial tenemos:

$$\mu_{i+1,j} \text{ por } \psi_{i+1,j} \text{ y} \quad (54)$$

$\mu_{i+1,j+1}$ por $\psi_{i+1,j+1}$, tenemos:

$$\begin{aligned} & -\frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j+1} + \left\{1 + \frac{\lambda}{2}(2 + R_a)\right\}\mu_{i,j+1} \\ & \quad - \frac{\lambda}{2}(1 + R_a)\mu_{i+1,j+1} \\ & = \frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j} + \left\{1 - \frac{\lambda}{2}(2 + R_a)\right\}\mu_{i,j} + \frac{\lambda}{2}(1 + R_a)\mu_{i+1,j} \end{aligned}$$

La cual puede ser escrita:

$$\begin{aligned} & -\frac{\lambda}{2} \quad 1 + \frac{\lambda}{2}(2 + R_a) \quad -\frac{\lambda}{2}(1 + R_a) \\ & = \frac{\lambda}{2} \quad 1 - \frac{\lambda}{2}(2 + R_a) \quad \frac{\lambda}{2}(1 + R_a) \end{aligned}$$

En donde el valor de λ usado es el correspondiente al punto (i, j).

- b. El punto (i, j) sobre el cual está centrada la ecuación de diferencias, se encuentra situado a la derecha de una frontera interna. Con un procedimiento análogo al efectuado en el inciso a, podemos obtener

un potencial aparente en los puntos (i+1, j) e (i-1, j+1), llegando a las siguientes expresiones.

$$R_b = \frac{a\left(1 - \frac{K_L+1}{K_L}\right)}{\left\{\frac{K_L+1}{K_L} + b\left(1 - \frac{K_L+1}{K_L}\right)\right\}} \quad (55)$$

Por sustitución en la ecuación

$$\mu_{i-1,j} \text{ por } \psi_{i-1,j} \text{ y } \mu_{i-1,j+1} \text{ por } \psi_{i-1,j+1} \quad (56)$$

Resulta

$$\begin{aligned} & -\frac{\lambda}{2}(1 + R_b)\mu_{i-1,j+1} + \left\{1 + \frac{\lambda}{2}(2 + R_b)\right\}\mu_{i,j+1} \\ & \quad - \frac{\lambda}{2}\mu_{i+1,j+1} \\ & = \frac{\lambda}{2}(1 + R_b)\mu_{i-1,j} + \left\{1 - \frac{\lambda}{2}(2 + R_b)\right\}\mu_{i,j} + \frac{\lambda}{2}\mu_{i+1,j} \end{aligned} \quad (57)$$

La cual puede ser escrita:

$$\begin{aligned} & -\frac{\lambda}{2}(1 + R_b) \quad 1 + \frac{\lambda}{2}(2 + R_b) \quad -\frac{\lambda}{2} \\ & = \frac{\lambda}{2}(1 + R_b) \quad 1 - \frac{\lambda}{2}(2 + R_b) \quad \frac{\lambda}{2} \end{aligned}$$

5.1.2.2 Solución numérica

Haciendo $j=0$ y aplicando la ecuación de diferencias principal a los nodos internos, con excepción de los primeros puntos situados a la izquierda, en cuyo caso deben aplicarse las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j+1} + \left\{1 + \frac{\lambda}{2}(2 + R_a)\right\}\mu_{i,j+1} - \frac{\lambda}{2}(1 + R_a)\mu_{i+1,j+1} & (58) \\
 & = \frac{\lambda}{2}\mu_{i-1,j} + \left\{1 - \frac{\lambda}{2}(2 + R_a)\right\}\mu_{i,j} + \frac{\lambda}{2}(1 + R_a)\mu_{i+1,j} \\
 & -\frac{\lambda}{2}(1 + R_b)\mu_{i-1,j+1} + \left\{1 + \frac{\lambda}{2}(2 + R_b)\right\}\mu_{i,j+1} - \frac{\lambda}{2}\mu_{i+1,j+1} \\
 & = \frac{\lambda}{2}(1 + R_b)\mu_{i-1,j} + \left\{1 - \frac{\lambda}{2}(2 + R_b)\right\}\mu_{i,j} + \frac{\lambda}{2}\mu_{i+1,j}
 \end{aligned}$$

Tomando en consideración las expresiones de condición inicial y de frontera externa, se obtienen las ecuaciones tridiagonal de $M-1$ ecuaciones con $M-1$ incógnitas. Resolviendo este sistema de ecuaciones, se pasa a la segunda línea, y así sucesivamente, de una manera análoga a como se procedió en el caso de un solo estrato compresible. El sistema de ecuaciones que se tiene en cada línea de tiempo es de la siguiente forma:

$$b_1\mu_{1,j+1} + c_1\mu_{2,j+1} = d_1 \quad (59)$$

$$a_i\mu_{i,j+1} + b_i\mu_{i,j+1} + c_i\mu_{i+1,j+1} = d_i$$

para $a \leq i \leq M - 2$

$$a_{M-1}\mu_{M-2,j+1} + b_{M-1}\mu_{M-1,j+1} = d_{M-1}$$

Donde para el primer renglón se tiene:

$$b_1 = (1 + \lambda_1)c_1 = -\frac{\lambda_1}{2}d_1 \quad (60)$$

$$= (1 - \lambda_1)\mu_{i,j} + \frac{\lambda_1}{2}(\mu_{0,j+1} + \mu_{0,j} + \mu_{2,j})$$

En los nodos interiores, exceptuando los puntos con condiciones de frontera interna:

$$a_i = -\frac{\lambda_L}{2}b_i = (1 + \lambda_L)c_i = -\frac{\lambda_L}{2} \quad (61)$$

$$d_i = (1 - \lambda_L)\mu_{i,j} + \frac{\lambda}{2}(\mu_{i-1,j} + \mu_{i+1,j})$$

Para el primer nodo situado a la derecha de una frontera interna

$$a_i = -\frac{\lambda_{L+1}}{2}(1 + R_{b_L})b_i = 1 + \frac{\lambda_{L+1}}{2}(2 + R_{b_L})c_i = -\frac{\lambda_{L+1}}{2} \quad (62)$$

$$d_i = \frac{\lambda_{L+1}}{2}\mu_{i+1,j} + \left\{1 - \frac{\lambda_{L+1}}{2}(2 + R_{b_L})\right\}\mu_{i,j} + \frac{\lambda_{L+1}}{2}(1 + R_{b_L})\mu_{i-}$$

Y finalmente, para el último renglón del sistema:

$$a_{M-1} = -\frac{\lambda_{N_s}}{2}b_{M-1} = 1 + \lambda_{N_s}d_{M-1} \quad (63)$$

$$= \frac{\lambda_{N_s}}{2}(\mu_{M,j+1} + \mu_{M-1,j} + \mu_{M,j}) + (1 - \lambda_{N_s})\mu_{M-1,j}$$

5.1.2.3 Simulación del modelo

Para esta simulación utilizaremos cuatro estratos, igual que el caso anterior estos se encuentran entre dos estratos permeables, los cuales permiten que drene agua libremente. Los datos pueden ir variando según las características del terreno, suponemos que, al momento de la aplicación de la carga, el exceso de presión hidrostática es igual al esfuerzo producido por esta sobrecarga, el cual se distribuye uniformemente sobre el espesor total del estrato. Los datos tomados pertenecen a los presentados por Shiffmann y Stein en su trabajo denominado "One-dimensional consolidation of layered systems". Se tomará los siguientes datos:

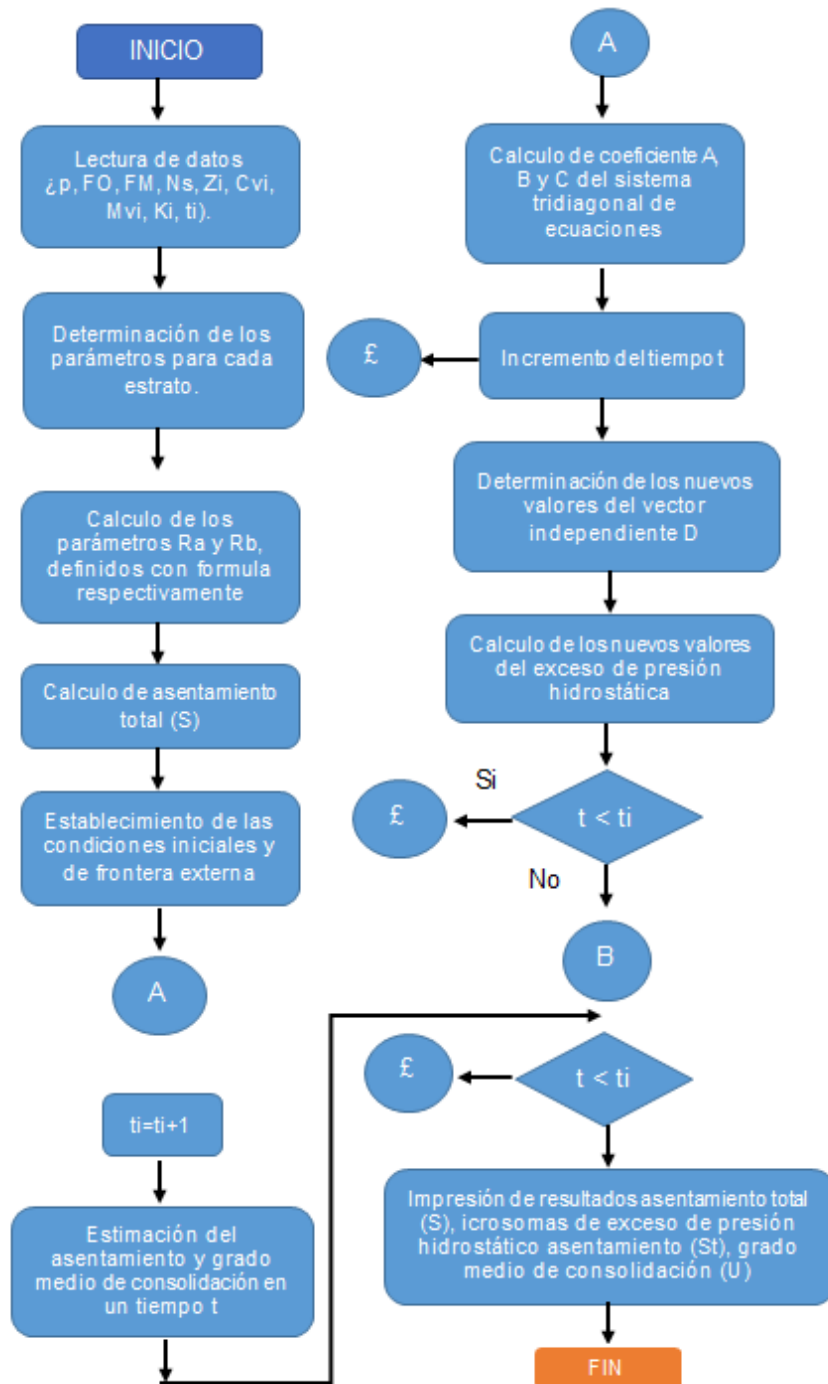
Tabla 3.

Datos de simulación para consolidación unidimensional para varios estratos.

Nº de estratos	Cv (pies ² /día)	Mv (pies ² /día)	K (pies/día)	Espesor (pies)
1	0,0411	3,07x10 ⁻³	7,89x10 ⁻⁶	10
2	0,1918	1,95 x10 ⁻³	2,34x10 ⁻⁵	20
3	0,0548	9,74 x10 ⁻⁴	3,33x10 ⁻⁶	30
4	0,0686	1,94 x10 ⁻³	8,35x10 ⁻⁶	20

Fuente: Schiffmann & Stein (1970)

5.1.2.4 Diagrama del modelo de simulación



CAPÍTULO VI

RESULTADOS

6.1 Resultados de ensayos de laboratorio

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de mecánica de suelos y laboratorio de Geotecnia, de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann y Universidad Nacional del Altiplano respectivamente; se adjuntan en los anexos, los certificados de los mismos.

Estos ensayos nos han permitido caracterizar los suelos de la zona de estudio y conocer sus propiedades físicas.

6.1.1 Ensayo de densidad in situ (Cono de arena)

Se ha realizado el ensayo de densidad in situ, mediante el método del cono de arena; a continuación, se muestran los resultados en el cual nos da a conocer que el promedio de densidad seca del suelo es 1,458 gr/cm³, lo que indica que el suelo está conformado por arenas arcillosas. Ver Tabla 4.

Tabla 4.

Resultados de densidad In Situ (Cono de arena)

Calicata N°	Densidad húmeda In Situ (gr/cm ³)	Porcentaje de humedad (%)	Densidad Seca In Situ (gr/cm ³)	Promedio de Densidad Seca In Situ (gr/cm ³)
01	1,757	32,66	1,324	1,458
02	2,026	27,21	1,593	

6.1.2 Ensayo de contenido de humedad

A continuación, se muestran los resultados del contenido de humedad de las muestras tomadas para cada una de las calicatas, en la cual se puede apreciar que el contenido de humedad promedio es de 29,93%, lo que indica que el suelo tiene humedad media ya que al tacto la muestra se desmorona y aglutina. Ver tabla 5.

Tabla 5

Resultados de Contenido de humedad

Calicata N°	% de contenido de humedad	Promedio de % de contenido de humedad
01	32,66	29,93
02	27,21	

6.1.3 Grado de saturación

A continuación, se muestran los resultados del grado de saturación del suelo, para las dos muestras tomadas de cada una de las calicatas, en la cual se puede apreciar que el promedio es de 71,51%, ver tabla 6.

Tabla 5.

Resultados de Grado de Saturación

Calicata N°	Grado de Saturación %	Promedio de Grado de Saturación %
01	73,67	71,51
02	69,36	

6.1.4 Análisis granulométrico de suelo por tamizado

El análisis granulométrico realizado a las muestras obtenidas, determina que el suelo tiene una clasificación SUCS SC (arenas arcillosas) y AASHTO A-6 (suelo arcilloso). Ver tabla 7.

Tabla 6.

Análisis granulométrico de suelo por tamizado

Calicata N°	SUCS	AASHTO
01	SC	A-6
02	SC	A-6

6.1.5 Ensayo de límite de consistencia

Los límites de consistencia, nos ayudan a caracterizar el comportamiento del suelo, a continuación, se muestran los resultados obtenidos que determinan que el suelo tiene una clasificación SUCS SC (arenas arcillosas) y AASHTO A-6 (suelo arcilloso), ver tabla 8.

Tabla 7.

Resultados de Límite de consistencia

Calicata N°	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad
01	33,00	25,94	7,06
02	33,80	26,30	7,50

6.1.6 Ensayo de peso específico de grava y arena

A continuación, se muestra el promedio del peso específico de las muestras de arena, pues queda demostrado por el tamaño de las partículas de suelo que no existe grava, ver tabla 9.

Tabla 8.

Resultado de Peso Específico

Calicata N°	Peso Específico (gr/cm3)	Promedio de Peso Específico (gr/cm3)
01	2,55	2,535
02	2,52	

6.1.7 Perfil estratigráfico

A continuación, se describe el perfil estratigráfico de las calicatas realizadas en la zona de estudio, cabe precisar que se encontraron dos estratos diferenciados, para la elaboración de este perfil se utilizó la carta de colores de Munsell. Ver tabla 10.

Tabla 9.

Resultados de Perfil Estratigráfico

Calicata N°	Descripción	
	Estrato 01	Estrato 02
01	Suelo conformado por arena superficial, limos de color beige claro y material orgánico	Arenas arcillosas (SC) de tonalidad marrón claro. Fracción fina presenta plasticidad. Tiene contenido de humedad de 32,66 %. Compacidad baja a moderada. Tamaño máximo de gravas de 4,75mm.
02	Suelo conformado por arena superficial, limos de color beige claro y material orgánico	Arenas arcillosas (SC) de tonalidad marrón. Fracción fina presenta plasticidad. Tiene contenido de humedad de 27,21 %. Compacidad baja a moderada. Tamaño máximo de gravas de 4,75mm.

6.1.8 Resultados de ensayo de consolidación unidimensional

La aplicación de carga unidimensional sobre un suelo saturado, da origen a la deformación de sus partículas, y a la salida de aire y/o agua presente en él, modificando el volumen inicial del suelo, a este fenómeno

se le llama consolidación; a continuación, se muestran los resultados de consolidación obtenidos para las muestras. Ver Tabla 11 y Tabla 12 respectivamente.

Tabla 10.

Resultados de ensayo de Consolidación Unidimensional. Etapa de Carga

Etapa de carga					
Calicata N°	Carga Aplicada (Kg/cm²)	Densidad Seca (gr/cm³)	Relación de vacíos (e)	Deformación vertical (%)	Coefficiente de consolidación (cm²/min)
01	0,13	1,550	0,728	0,000	
	0,50	1,581	0,695	1,956	0,01812
	1,00	1,612	0,663	3,805	0,06530
	2,00	1,662	0,613	6,704	0,08287
	4,10	1,733	0,546	10,553	0,09249
	8,10	1,812	0,479	14,453	0,06746
			1,812	0,479	14,453
Etapa de carga					
Calicata N°	Carga Aplicada (Kg/cm²)	Densidad Seca (gr/cm³)	Relación de vacíos (e)	Deformación vertical (%)	Coefficiente de consolidación (cm²/min)
02	0,25	1,331	0,934	0,000	
	0,50	1,341	0,919	0,755	0,02948
	1,00	1,351	0,904	1,543	0,00898
	2,00	1,386	0,857	3,981	0,09128
	4,10	1,496	0,719	11,086	0,06879
	8,10	1,636	0,573	18,646	0,03110
	13,60	1,786	0,441	25,490	0,01150
	32,6	1,944	0,323	31,563	0,01233

Tabla 11.

Resultados de ensayo de Consolidación Unidimensional. Etapa de Descarga

Etapa de descarga					
Calicata N°	Carga Aplicada (Kg/cm ²)	Densidad Seca (gr/cm ³)	Relación de vacíos (e)	Deformación vertical (%)	Coefficiente de consolidación (cm ² /min)
01	0,0	1,812	0,479	14,453	-
	8,1	1,812	0,479	14,453	-
	4,1	1,807	0,483	14,224	-
	2,0	1,800	0,489	13,866	-
	1,0	1,791	0,496	13,425	-
	0,5	1,782	0,505	12,999	-
	0,3	1,773	0,511	12,566	-

Etapa de descarga					
Calicata N°	Carga Aplicada (Kg/cm ²)	Densidad Seca (gr/cm ³)	Relación de vacíos (e)	Deformación vertical (%)	Coefficiente de consolidación (cm ² /min)
02	32,6	1,944	0,323	31,563	-
	16,3	1,933	0,331	31,159	
	8,1	1,912	0,346	30,397	
	4,1	1,892	0,360	29,657	
	2,0	1,874	0,373	28,995	
	1,0	1,858	0,384	28,400	
	0,5	1,844	0,395	27,844	

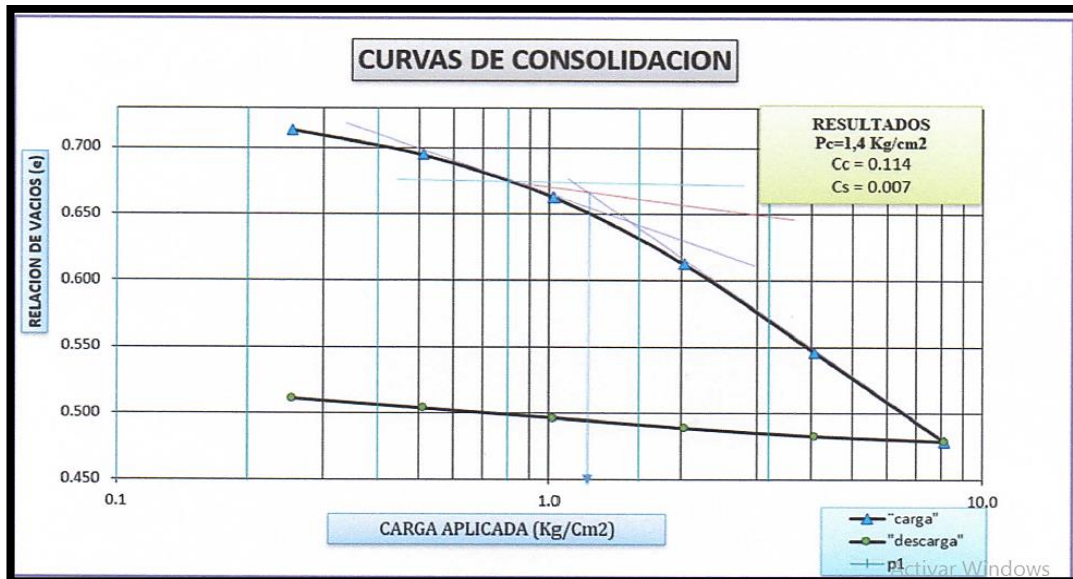


Figura 25. Curva de Consolidación. Calicata 01

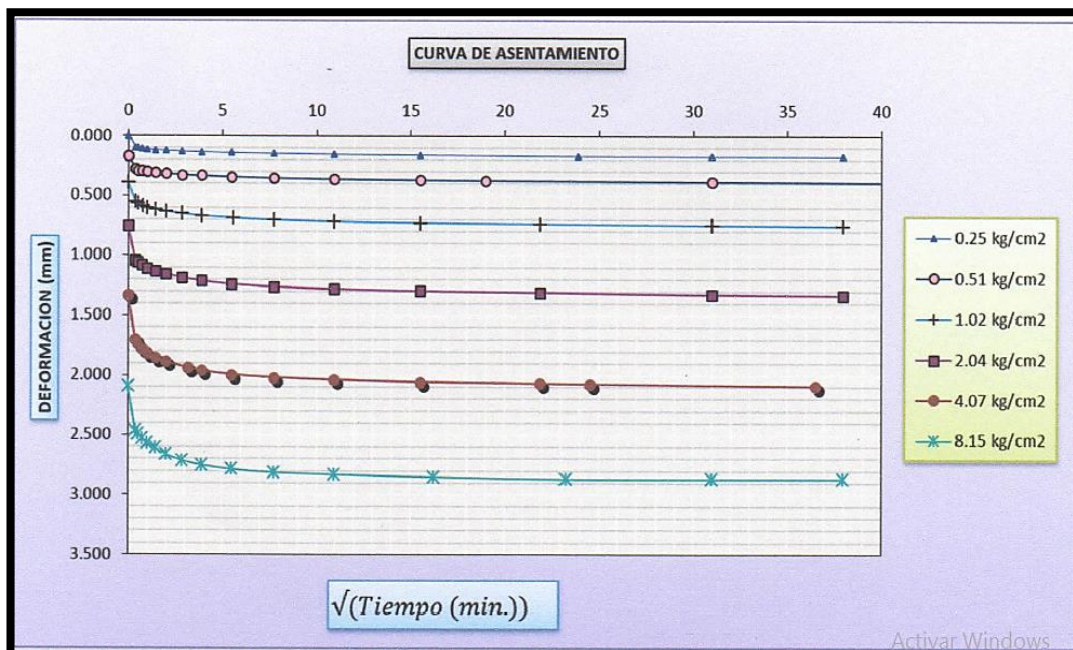


Figura 26. Curva de Asentamiento. Calicata 01

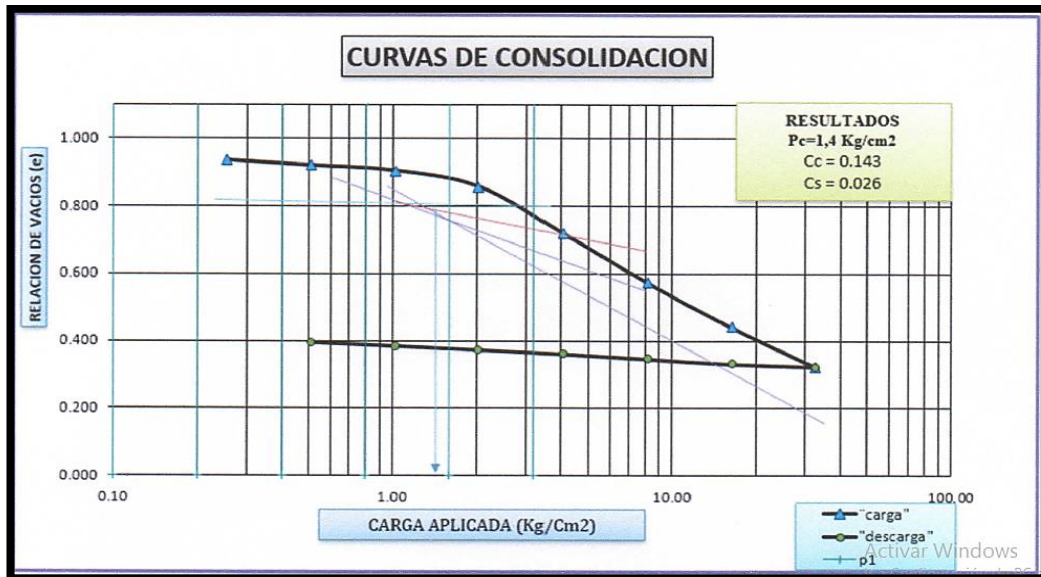


Figura 27. Curva de Consolidación. Calicata 02

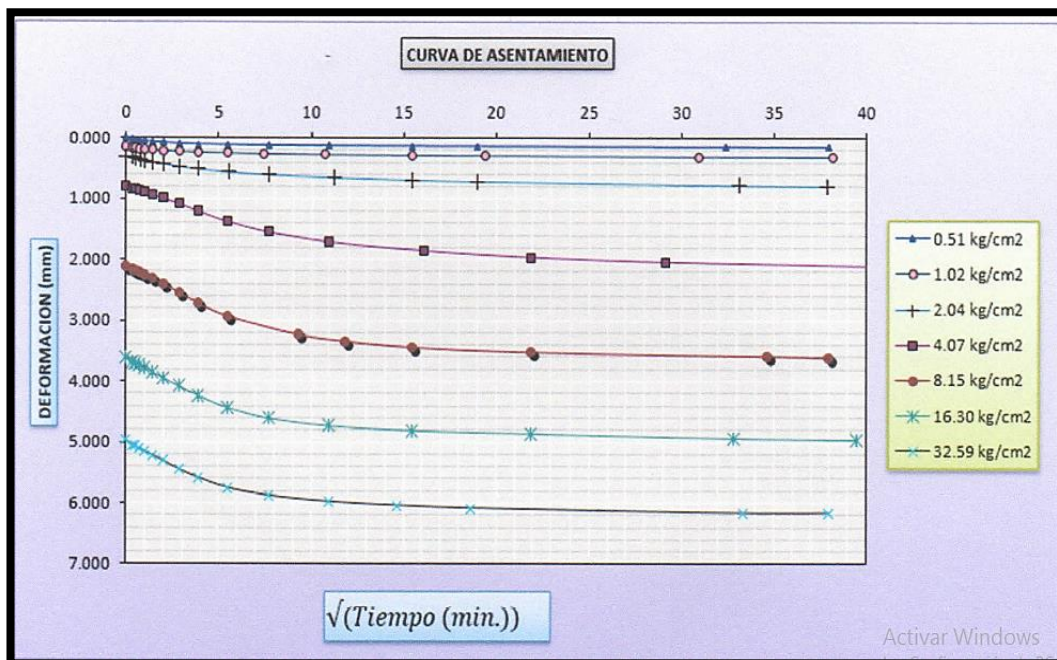


Figura 28. Curva de Asentamiento. Calicata 02

6.2 Resultados para la consolidación unidimensional para un estrato (modelo propuesto)

A continuación, se muestra los resultados obtenidos aplicando nuestro modelo. Se representa en la Tabla 13 y Figura 28.

Tabla 12.

Resultado de asentamiento y grado de consolidación para un estrato

Tiempo	1	2	5
Grado medio de Consolidación U	0,4265	0,6053	0,8640
Asentamiento Total S (metros)	0,0864	0,1227	0,1751

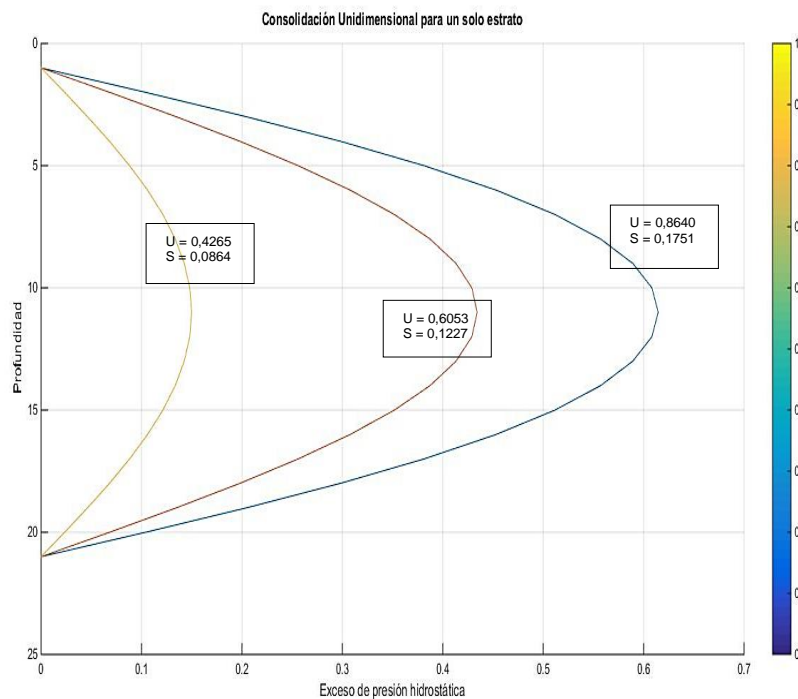


Figura 29. Curva de consolidación unidimensional para un estrato

Tabla 13.

Resultado de consolidación unidimensional para un estrato

Nodo	1 año	2 años	5 años
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,1041	0,0682	0,0234
2	0,2046	0,1347	0,0463
3	0,2979	0,1979	0,0681
4	0,3814	0,2560	0,0881
5	0,4530	0,3078	0,1060
6	0,5118	0,3519	0,1213
7	0,5571	0,3873	0,1336
8	0,5892	0,4132	0,1426
9	0,6082	0,4289	0,1480
10	0,6145	0,4342	0,1499
11	0,6082	0,4289	0,1480
12	0,5892	0,4132	0,1426
13	0,5571	0,3873	0,1336
14	0,5118	0,3519	0,1213
15	0,4530	0,3078	0,1060
16	0,3814	0,2560	0,0881
17	0,2979	0,1979	0,0681
18	0,2046	0,1347	0,0463
19	0,1041	0,0682	0,0234
20	0,0000	0,0000	0,0000

6.3 Resultados para la consolidación unidimensional para varios estratos (modelo calibrado)

A continuación, se muestra los resultados obtenidos ajustando nuestro modelo con los datos de Shiffmann y Stein, tomando el mismo tiempo. Ver Tabla 15 y Figura 29.

Tabla 14.

Resultado de asentamiento y grado de consolidación de varios estratos

Tiempo	1	2	5
Grado medio de Consolidación U	0,756	0,506	0,252
Tiempo (días)	7 197	2 930	740

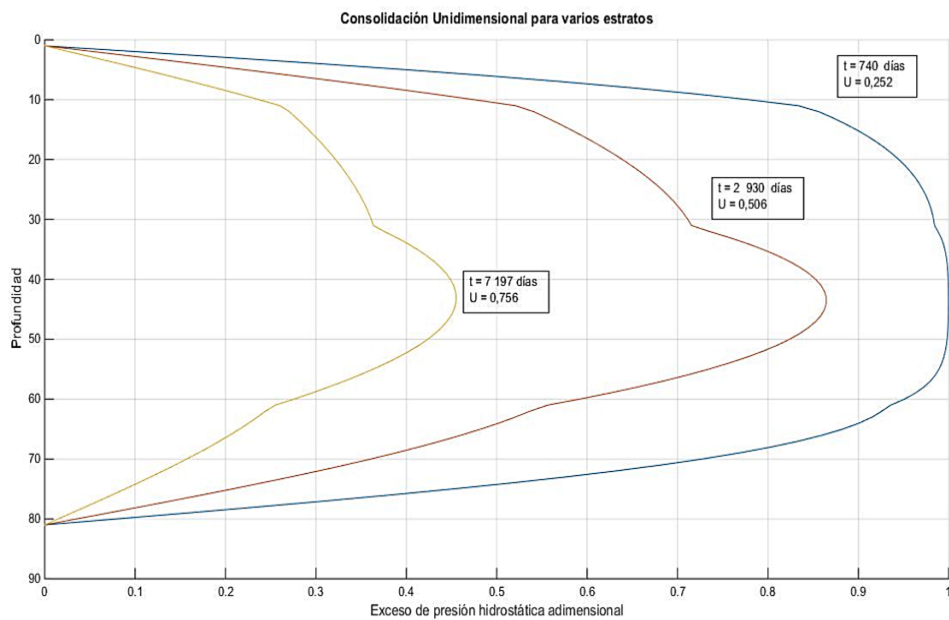


Figura 30. Curva de consolidación unidimensional para varios estratos

CAPÍTULO VII

DISCUSIÓN

7.1 Análisis de resultados de ensayo de consolidación unidimensional para un estrato

A continuación se muestra los resultados obtenidos en nuestro modelo propuesto, comparado con los resultados obtenidos por el modelo de Schiffmann y Stein, y con los resultados obtenidos en laboratorio, aplicando la teoría de Terzaghi, se obtuvo la siguiente información para su análisis e interpretación. Ver Tabla 16.

Tabla 15.

Análisis de resultado de ensayo de consolidación unidimensional

Grado medio de Consolidación U			
N° Muestra	Laboratorio	Modelo Schiffmann y Stein	Modelo Calamullo
1	0,9550	0,9414	0,8640
2	0,9640	0,9531	0,8952

Asentamiento Total S (metros)			
N° Muestra	Laboratorio	Modelo Schiffmann y Stein	Modelo Calamullo
1	0,1814	0,1900	0,1751
2	0,1898	0,1964	0,1862

Deformación Vertical (%)			
N° Muestra	Laboratorio	Modelo Schiffmann y Stein	Modelo Calamullo
1	3,62	3,80	3,50
2	3,80	3,92	3,72

Con esto podemos concluir que los resultados obtenidos en nuestro trabajo se acercan mucho a los resultados obtenidos por Schiffmann y Stein. Sin embargo no son tan precisos como los resultados obtenidos por laboratorio; en cinco años nuestros resultados se asemejan al 90 %, a los resultados de laboratorio; Si deseamos obtener un mejor resultado, debemos tomar Δz y Δt más pequeños en nuestro modelo.

7.2 Análisis de resultados de ensayo de consolidación unidimensional para varios estratos

A continuación de muestran los resultados obtenidos en nuestro modelo, que se corrió con los datos del modelo de Schiffmann y Stein, tomando el mismo tiempo, comparado con los resultados obtenidos mediante laboratorio. Ver Tabla 17.

Tabla 16.

Análisis de resultado de ensayo de consolidación unidimensional para varios estratos

Grado medio de Consolidación U			
N° Muestra	Laboratorio	Modelo Schiffmann y Stein	Modelo Calamullo
1	0,246	0,252	0,252
2	0,245	0,250	0,250
Tiempo (días)			
N° Muestra	Laboratorio	Modelo Schiffmann y Stein	Modelo Calamullo
1	740	740	740
2	740	740	740

Con esto podemos concluir que los resultados obtenidos en nuestro modelo, con los resultados del modelo de Schiffmann y Stein, son muy similares; asimismo, se asemejan mucho a los resultados obtenidos en laboratorio. Por lo cual se podría decir que nuestro modelo propuesto es confiable. Si deseamos obtener un mejor resultado debemos obtener una mejor aproximación tomando Δz y Δt más pequeños.

CONCLUSIONES

- Se realizó el análisis de la subsidencia unidimensional en los suelos de la zona de Ite – Tacna, aplicando la modelación numérica en diferencias finitas, se utilizó el método de Crank-Nicholson, el cual nos permite resolver las ecuaciones de diferencias parciales de forma $\mu_t = \mu_{zz}$, este método nos sirve para resolver la ecuación de consolidación de Terzaghi, se desarrolló un lenguaje de programación en el programa Matlab el cual nos permite determinar la consolidación unidimensional del suelo.
- Se logró determinar la subsidencia unidimensional con flujo de agua vertical, para un solo estrato compresible, empleando el método de diferencias finitas de Crank – Nicholson, se tomaron en cuenta el ensayo de consolidación de suelos realizado, luego se realizó un análisis comparando nuestro resultado obtenido, con los resultados obtenidos por Shiffmann y Stein, los cuales emplearon la serie de Fourier, llegándose a determinar que para 5 años podríamos tener un grado de consolidación (U) de 0,8640 y un asentamiento total (S) de 0,1751 metros, en el caso de los datos obtenidos por Shiffmann y Stein para 5 años obtuvieron un grado de consolidación de 0,9414 y un asentamiento total de 0,190 metros, aproximándose

mucho a nuestros resultados, lo cual indica que la simulación realizada nos sirve para poder utilizarla.

- Se determinó también la subsidencia unidimensional con flujo de agua vertical, para varios estratos compresibles, haciendo uso del método de diferencias finitas de Crank – Nicholson, lo mismo que en el punto anterior se realizó un análisis comparando nuestro resultado obtenido, con los resultados obtenidos por Shiffmann y Stein, los cuales emplearon la serie de Fourier, obteniéndose un grado de consolidación (U) para 5 años de 0,252, esto en un tiempo de 740 días, los resultados son los mismos que Shiffmann y Stein, quedando comprobado que la simulación funciona para poder trabajar varios estratos.
- Realizando los ensayos de laboratorio se logró determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo en la zona de estudio, los cuales presentan una densidad de 2,206 gr/cm³, un contenido de humedad de 32,66 %, logramos determinar también que se tiene un suelo con una clasificación SC, usando el método de SUCS y A-6 para la clasificación AASHTO, en el caso de los límites de consistencia se tiene que presentan un límite líquido de 33 %, límite plástico de 25,94 % y un índice de plasticidad de 7,06 %.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el remplazo del suelo, por rellenos controlados compactados adecuadamente (Norma Técnica E.050).
- De acuerdo a Semkin (1986) es posible realizar una estabilización química a base de bióxido de carbono, silicato de sodio y bióxido de carbono en suelos colapsables.
- En caso se necesite cimentar una estructura pesada en un suelo altamente colapsable, se puede considerar un tipo de cimentación con columna de roca.
- En caso se tengan condiciones más desfavorables, se debe considerar el reemplazo de este material o utilizar pilotes de cimentación que transfieran la carga de la estructura a un estrato rocoso.
- Según Mitchell (1981) se propone utilizar métodos del tratamiento del suelo, en función al tamaño de grano.
- Considerar el método de vibro compactación, para conseguir altas densidades y buena uniformidad del suelo de cimentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderssohn J., Hans-Ulrich Wetzell, Thomas R. Walter, Mahdi Motagh, Yahya Djamour, Hermann Kaufmann. (2008). Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: Results from InSAR and levelling. *Geophysical Journal International*, (174), 287–294.
- Cier, R. (2015). Procedimiento de Interpolación en el cálculo de asentamiento sobre suelos granulares usando el método de Schmertmann. (Tesis de Pre grado). Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Corapcioglu, M. Y. (1984). *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. Land subsidence a state of the art review* (Vol. (82)). (J. Bear, Ed.) Haifa 32000, Israel: Martinus Nijhoff Publishers.
- Chai, J. C., Shen, S. L., Zhu, H. H., & Zhang, X. L. (2004). Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai. *Geotechnique*, (54), 143-147.

- Chou, P.-Y., & Ting, C.-S. (2007). Feasible Groundwater Allocation Scenarios for Land Subsidence Area of Pingtung Plain, Taiwan. *Water Resources*, (34), 259-267.
- Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. (2016). *Geomecánica para Ingenieros*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Johnson, K. S. (2005). *Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States* (Vol. (48)).
- Martínez, J. P. (2007). *Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*. México: Centro de Geociencias, UNAM campus Juriquilla, Querétaro.
- Mitchell, J. K. (1981), en Olalla (2006). *Metodos de mejora aplicables a diferentes tipos de suelos*.
- Narvaez, S. (1964). *Geología de los Cuadrangulos de Ilo y Locumba*. Lima: Comisión de la Carta Geológica Nacional.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, I. C. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. Paris: Book Crafters, Chelsea, Michigan.

- Prokopovich, N. P. (1979). Genetic Classification of Land Subsidence. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, (14), 389-399.
- Schiffmann, R. L., & Stein, J. R. (1970). One-Dimensional Consolidation of layered systems. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, (96), 1499-1502.
- TEAM, S. H. (1973). On the control of surface subsidence in shanghai. Shanghai: Acta Geologica Sinica. 155-160.
- Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Vienna: Franz Deuticke.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: Jhon Wiley and Sons, INC.
- Tessitore, S. (2014). *Application of DInSAR techniques to the monitoring of ground deformations*. Barcelona: Universidad Politécica de Cataluña.
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). Subsistencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, (17), 295-302.

Vázquez, N. J., & de Justo Alpañés, J. L. (2000). Aplicación de diversos métodos numéricos para el cálculo de la subsidencia unidimensional en un suelo saturado en el caso de Murcia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, (16), 251-279.

Xue, Y. Q., Zhang, Y., Ye, S. J., Wu, J. C., & Li, Q. F. (2005). Land subsidence in China. *Environmental Geology*, 713-720.

ANEXOS

Anexo 1. Codificación del programa

```
clc
clear

T = 5;DP =0.7;FO = 0; FM = 0; IT = 1;
H = 5; CV = 1.4522; MV = 0.0579; K = 1.6*10^-6;
dz = 0.25;
B =[0:dz:H]; n=length(B);
dt = 0.1;
A =[0:dt:T]; m=length(A);
S = MV * DP * H ;
L = CV * dt / (dz^2);
U = ones(m,n) ;

%condiciones iniciales y de frontera

U (:,1) = FO;
U(:,n) = FM;
U(1,:) = DP ;
U(2,:) = DP ;

while IT<100;
    for j=3:m
        for i=3:n-2
            U(j,i)=((L/2)*(U(j-1,i-1)+U(j-1,i+1)))+(1-L)*U(j-1,i));
```

```

end
U(j,2)= (L/2)*(U(j,1)+ U(j-1,1)+ U(j-1,3))+(1-L)*U(j-1,2);
U(j,n-1)= (L/2)*(U(j,n)+U(j-1,n)+U(j-1,n-2))+(1-L)*U(j-1,n-1);

BE(2)=1+L;
GA(2)=U(j,2)/BE(2);
for i=3:n-1
    BE(i)=(1+L)-((-L/2)*(-L/2)/BE(i-1));
    GA(i)=(U(j,i)-(-L/2)*GA(i-1))/BE(i);
end
U(j,n-1)=GA(n-1);
for i=n-2:-1:2
    U(j,i)=GA(i)-((-L/2)*U(j,i+1))/BE(i);
end
end
IT=IT+1;
end
for j=2:m
    A1= U(j,1)+U(j,n);
    for i=2:n-1
        A1=A1+2*U(j,i);
    end
    A2=(A1*dz)/2;

```

```

AS(j)=MV*(DP*H-A2);
E(j)=AS(j)/S;
end
U
ASENT=AS(12),AS(22),AS(51)
GM Consolidación=E(12), E(22), E(51)
year1=U(12,:)
year2=U(22,:)
year5=U(51,:)
hold on
plot(year1)
plot(year2)
plot(year5)
grid on

```

Programa 1. Modelación numérica para un estrato

```

clc
clear
%condiciones de matriz y estratos
DP =1 ;FO = 0 ;FM = 0 ;IT = 0; NS=4;
T=7195;
dt=5;

```

```

CV = [0.0411 0.1918 0.0548 0.0686];
MV = [3.07*10^-3 1.95*10^-3 9.74*10^-4 1.95*10^-3] ;
K = [7.89*10^-6 2.34*10^-5 3.33*10^-6 8.35*10^-6];

%Datos Inamovibles

H = 80;

P=[10 30 60 80]; %profundidades
E=[10 20 30 20];% espesores
DZ =P(NS)/H;
Q =[0:DZ:H];
n=length(Q);

%número de nodos en columnas

W =[0:dt:T];
m=length(W);
it=0;
AT=0;l=0;

%cálculo de parámetros Lamba
for i= 1: NS
    L(i) = CV(i) * dt / (DZ^2);
    S(i) = MV(i) * DP * E(i);
    AT = AT + S(i);
end
AT

```

```

for j= 1: NS-1
    ZO = l*DZ;
    Z=P(j);
    l=l+1;
    if Z >= ZO
        AO(j)=0.2;
        BO(j)=(1-AO(j));
        K1= K(j) / K(j+1);
        K2=1/K1;
        RA(j)=((BO(j)) *(1-K1))/(K1+AO(j)*(1-K1));
        RB(j)=((AO(j)) *(1-K2))/(K2+BO(j)*(1-K2));
    end
end

```

%cálculo de los coeficientes A, B, y C sistema de ecuaciones 4.15

```

for w=1:4
    B(2) =1+L(1);
    C (2) =-L (1)/2;
    for l=3: P (1)
        A(l)=-L (1)/2;
        B(i)=1+L(1);
        C(i)=-L(1)/2;
    end

```

```

A(11)=-L(1)/2;
B(11)=1+((L(1)/2)*(2+RA(1)));
C(11)=-L(1)/2*(1+RA(1));
A(12)=-L(2)/2*(1+RB(1));
B(12)=1+L(2)/2*(2+RB(1));
C(12)=-L(2)/2;
for i=13:P(2)
    A(i)=-L(2)/2;
    B(i)=1+L(2);
    C(i)=-L(2)/2;
end
A(31)=-L(2)/2;
B(31)=1+L(2)/2*(2+RA(2));
C(31)=-L(2)/2*(1+RA(2));
A(32)=-L(3)/2*(1+RB(2));
B(32)=1+L(3)/2*(2+RB(2));
C(32)=-L(3)/2;

for i=33:P(3)
    A(i)=-L(3)/2;
    B(i)=1+L(3);
    C(i)=-L(3)/2;
end

```

```

A (61) =-L (3) /2;
B (61) =1+L (3) /2*(2+RA (3));
C (61) =-L (3) /2*(1+RA (3));
A (62) =-L (4)/2*(1+RB (3));
B (62) =1+L (4)/2*(2+RB (3));
C (62) =-L (4)/2;
for l=63: P (4)-1
    A(l)=-L (4)/2;
    B(l)=1+L (4);
    C(l)=-L (4)/2;
end
A (80) =-L (4)/2;
B (80) =1+L (4);
end
U = ones (m, n);
%condiciones iniciales y de frontera
U (:1) = FO;
U (: n) = FM;
U (1, :) = DP;
U (2, :) = DP;

chile IT < 100
    foro j=3:m

```

```

        U(j,2) = (L (1) /2) *(U(j,1) + U(j-1,1) + U(j-1,3)) +(1-L (1)) *U(j-1,2);
%condición de los d1

        for l=3: P (1)

                U(jig) = ((L (1)/2) *(U (j-1, i-1) + U (j-1, i+1)) + (1-L (1)) *U (j-
1, i)); %estate 1

        end

                %frontera interna1

                U(j,11) = ((L(1)/2)*U(j-1,10)) + (1-(L(1)/2)*(2+RA(1)))*U(j-
1,11) + (L(1)/2)*(1+RA(1))*U(j-1,12) ;

                U(j,12) = ((L(2)/2)*U(j-1,13)) + (1-(L(2)/2)*(2+RB(1)))*U(j-
1,12) + (L(2)/2)*(1+RB(1))*U(j-1,11) ;

        for l=13: P (2)

                U(jig) = ((L (2)/2) *(U (j-1, i-1) + U (j-1, i+1)) + (1-L (2)) *U (j-
1, i)); %estate 2

        end

                %frontera interna2

                U(j,31) = ((L(2)/2)*U(j-1,30)) + (1-(L(2)/2)*(2+RA(2)))*U(j-
1,31) + (L(2)/2)*(1+RA(2))*U(j-1,32) ;

                U(j,32) = ((L(3)/2)*U(j-1,33)) + (1-(L(3)/2)*(2+RB(2)))*U(j-
1,32) + (L(3)/2)*(1+RB(2))*U(j-1,31) ;

        for l=33: P (3)

                U(jig) = ((L (3)/2) *(U (j-1, i-1) + U (j-1, i+1)) + (1-L (3)) *U (j-
1, i)); %estate 3

        end

                %frontera interna3

                U(j,61) = ((L(3)/2)*U(j-1,60)) + (1-(L(3)/2)*(2+RA(3)))*U(j-
1,61) + (L(3)/2)*(1+RA(3))*U(j-1,62) ;

```

```

        U(j,62) = ((L(4)/2)*U(j-1,63)) + (1-(L(4)/2)*(2+RB(3)))*U(j-
1,62) + (L(4)/2)*(1+RB(3))*U(j-1,61) ;

        for l=63:(P (4)-1)

            U(jig) = ((L (4)/2) *(U (j-1, i-1) + U (j-1, i+1)) + (1-L (4)) *U (j-
1, i)); %estate 4

        end

        U (j, n-1) = (L (4) /2) *(U(jun.) +U (j-1, n) +U (j-1, n-2)) +(1-L (4))
*U (j-1, n-1);

        BE (2) =B (2);

        GA (2) =U(j,2)/BE (2);

        for l=3: n-1

            BE(l)=B(l)-((A(l)*C(i-1))/BE(i-1));

            GA(l)=(U(jig)-(A(l)*GA(i-1)))/BE(l);

        end

        U (j, n-1) =GA(n-1);

        for l=n-2: -1:2

            U(jig)=(GA(l)-(C(l)*U (j, i+1))/BE(l));

        end

    end

    IT=IT+1;

end

JO=1;

ASE=0;

for j=1: NS

```

```

JI=P(j);
A1= U (1, JO+1) +U (m, JI+1);
for i=JO+1: JI+1

    A1=A1+2*U(jig);

end

A2=(A1*DZ)/2;
AS(j)=DP*MV(j)*P(j)-(MV(j)*A2);
ASE=ASE+AS(j);
JO=P(j);
end

ASE;
ES=(ASE)/AT;
U;
time1=U (148, :)
time2=U (587, :)
time3=U (m, :)
hold on

plot(time1)
plot(time2)
plot(time3)

gris en

```

Programa 2. Modelación numérica para varios estratos

Anexo 2. Variables empleadas en el programa

SIMBOLO	DEFINICION
PROGRAMA PRINCIPAL	
A, B, C, D	Coefficientes de los vectores definidos por la ecuación 3.6
CV	Coefficiente de consolidación.
DP	Incremento de esfuerzo totales.
DT	Incremento en el tiempo Δt .
DZ	Incremento de la profundidad ΔZ .
D1	$\lambda/2$
D2	$1 - \lambda$
E	Exceso de presión hidrostática μ .
FM	Condición de frontera inferior.
FO	Condición de frontera superior.
H	Espesor del estrato compresible.
LA	$\lambda = C_v \Delta t / (\Delta Z)^2$
M	Número de intervalos ΔZ , en los cuales se ha dividido el espesor del estrato.
MR	Matriz almacenadora de resultados (St, U y la isócrona de exceso de presión hidrostática).
MV	Coefficiente de simulación volumétrica.
S	Asentamiento total.
T	Tiempo, t.
T _i	i - ésimo nivel del tiempo en el que se desea conocer St, U y la isócrona de exceso de presión hidrostática.
SUBROUTINA TRIDIAGONAL	
BE	Vector β_i definido por la ecuación A.5.
GA	Vector γ_i definido por la ecuación A.6.
SUBROUTINA TRAPEZOIDAL	
AS	Asentamiento en un tiempo t.
A1	Variable auxiliar para calcular A2.
A2	Área bajo la isócrona de exceso de presión hidrostática.
U	Grado medio de consolidación.

Anexo 3. Ensayos de laboratorio



**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL
EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE – TACNA APLICANDO LA
MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS

REGION : TACNA

PROVINCIA : JORGE BASADRE

DISTRITO : ITE

UBICACIÓN : C-1

**ENSAYO DENSIDAD IN SITU - METODO DEL CONO Y ARENA
ASTM D1556 - 07**

HOYO N°	UNID.	01	
PROFUNDIDAD DEL HOYO DE PRUEBA	cm.	15.00	
VOLUMEN DEL HOYO :			
A PESO DE LA ARENA + FRASCO	gr.	7345	
B PESO DE LA ARENA REMANENTE + FRASCO	gr.	1827	
C PESO DE LA ARENA EMPLEADA	gr.	5518	
D PESO DE LA ARENA EN EL CONO Y PLACA	gr.	1676	
E PESO DE LA ARENA EN EL HOYO	gr.	3842	
F DENSIDAD DE LA ARENA	gr/cm3	1.490	
G VOLUMEN DEL HOYO	cm3	2578.3	
DENSIDAD HUMEDA :			
H PESO MUESTRA DEL HOYO + RECIPI.	gr.	4530	
I DENSIDAD HUMEDA IN SITU	gr/cm3	1.757	
CONTENIDO DE HUMEDAD :			
J PORCENT. DE HUMED. DE MUESTRA	%	32.66	
K DENSIDAD SECA IN SITU	gr/cm3	1.324	



EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

RESPONSABLE DE LABORATORIO



Vrb DR. CARLOS HUISA COORDINADOR
JEFE DE LABORATORIO CIP37291



Laboratorio 1. Ensayo de densidad In Situ (Cono de Arena). Calicata 01



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL
EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE - TACNA APLICANDO LA
MODELACION NUMERICA
REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACION : C-2

ENSAYO DENSIDAD IN SITU - METODO DEL CONO Y ARENA
ASTM D1556 - 07 -

Titulo: Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil In Place by the Sand-Cone Method

HOYO Nº	UNID.	01	
PROFUNDIDAD DEL HOYO DE PRUEBA	cm.	15.00	
VOLUMEN DEL HOYO :			
A PESO DE LA ARENA + FRASCO	gr.	7575	
B PESO DE LA ARENA REMANENTE + FRASCO	gr.	2420	
C PESO DE LA ARENA EMPLEADA	gr.	5155	
D PESO DE LA ARENA EN EL CONO Y PLACA	gr.	1676	
E PESO DE LA ARENA EN EL HOYO	gr.	3479	
F DENSIDAD DE LA ARENA	gr/cm3	1.490	
G VOLUMEN DEL HOYO	cm3	2334.7	
DENSIDAD HUMEDA :			
H PESO MUESTRA DEL HOYO + RECIP.	gr.	4730	
I PESO MUESTRA EXTRAIDA DEL HOYO	gr.	4730	
J DENSIDAD HUMEDA IN SITU	gr/cm3	2.026	
CONTENIDO DE HUMEDAD :			
K PORCENT. DE HUMED. DE MUESTRA	%	27.21	
PORCENTAJE DE COMPACTACION :			
DENSIDAD SECA IN SITU	gr/cm3	1.593	

EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

RESPONSABLE DE LABORATORIO

VIBI DR. CARLOS HUISA COON
JEFE DE LABORATORIO CIP37251



Laboratorio 2. Ensayo de densidad In Situ (Cono de Arena). Calicata 02



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS




ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE – TACNA APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS

REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACIÓN : C-1


**CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD
ASTM C566**

TITULO: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying

N° DE ENSAYOS	C-1			
	MUESTRA	E-1	E-2	E-3
COGICO DE LA TARA	-	T-1	T-2	T-3
PESO DE LA TARA	gr.	11.90	11.28	11.14
PESO DE LA MUESTRA HUMEDA + TARA	gr.	38.92	44.86	50.02
PESO DE LA MUESTRA SECA + TARA	gr.	31.63	37.00	40.94
PESO DEL AGUA	gr.	7.29	7.86	9.08
PESO DE LA MUESTRA SECA	gr.	19.73	25.72	29.80
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	36.95	30.56	30.47
PROMEDIO	%	32.66		


EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

RESPONSABLE DE LABORATORIO


VºBº DR. CARLOS HUIZA CORRI
JEFE DE LABORATORIO CIP 97294



Laboratorio 3. Ensayo de Contenido de Humedad. Calicata 01



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA
DE ITE – TACNA APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS
FINITAS
REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACIÓN : C-2

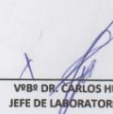
**CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD
ASTM C566**

TITULO: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying

N° DE ENSAYOS	C-2			
	MUESTRA	E-1	E-2	E-3
COGICO DE LA TARA	-	T-4	T-5	T-6
PESO DE LA TARA	gr.	11.30	11.27	10.97
PESO DE LA MUESTRA HUMEDA + TARA	gr.	44.10	39.17	45.01
PESO DE LA MUESTRA SECA + TARA	gr.	37.93	32.74	37.46
PESO DEL AGUA	gr.	6.17	6.43	7.55
PESO DE LA MUESTRA SECA	gr.	26.63	21.47	26.49
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	23.17	29.95	28.50
PROMEDIO	%	27.21		


EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

RESPONSABLE DE LABORATORIO


VIB® DR. CARLOS HUISA CCOIRI
JEFE DE LABORATORIO CIP37291



Laboratorio 4. Ensayo de Contenido de Humedad. Calicata 02



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDIENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE - TACNA APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS

REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACIÓN : G-3

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88

Peso de la grava : 0.00 gr Peso de la fracción fina : 413.3 gr
Peso de la arena : 3384.00 gr
Peso total : 3384.00 %

Tamices ASTM	Abertura en mm.	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% QUE PASA	DESCRIPCIÓN
31/2"	88.000	0.00	0.00	0.00	100.00	Lim. Líquido 33.00
3"	75.000	0.00	0.00	0.00	100.00	Lim. Plástico 25.94
2 1/2"	63.500	0.00	0.00	0.00	100.00	Ind. Plasticidad 7.06
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00	Clasificación de Suelos
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00	Grava (%) 0.0
1"	25.000	0.00	0.00	0.00	100.00	Arena (%) 100.0
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.00	100.00	Mod.Fineza (%) -
1/2"	12.500	0.00	0.00	0.00	100.00	Pasa N°4 100.0
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00	Pasa N°10 98.5
1/4"	6.250	0.00	0.00	0.00	100.00	Pasa N°40 90.7
N°4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00	Pasa N°200 47.0
N°10	2.000	6.10	1.48	1.48	98.52	D10 -
N°16	1.100	6.00	1.45	2.93	97.07	D30 -
N°20	0.840	5.10	1.23	4.16	95.84	D60 0.114
N°30	0.600	7.70	1.86	6.02	93.98	Cc -
N°40	0.425	13.40	3.24	9.27	90.73	Cu -
N°60	0.250	36.50	8.83	18.10	81.90	SIUCS SC
N°80	0.180	33.60	8.13	26.23	73.77	AASHTO A-6
N°100	0.150	22.10	5.35	31.57	68.43	
N°140	0.105	43.90	10.52	42.10	57.90	
N°200	0.075	45.10	10.91	53.01	46.99	
Base		194.21	46.99	100.00	0.00	

Curva Granulométrica

The graph plots the percentage of soil passing through various sieve sizes. The x-axis represents sieve size in millimeters on a logarithmic scale from 100,000 to 0.075. The y-axis represents the percentage of soil passing, ranging from 0 to 100. The curve starts at 100% for the 31/2" sieve and remains at 100% until the N°100 sieve (0.15 mm), after which it drops to approximately 47% at the N°200 sieve (0.075 mm).

EDGAR CHRISTIAN I. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

RESPONSABLE DE LABORATORIO



VºBº DR. CARLOS HUISA COPI

Laboratorio 5. Ensayo de Análisis Granulométrico. Calicata 01



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDIENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE - TACNA APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS

REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACIÓN : C-2

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88

Peso de la grava : 0.00 gr Peso de la fracción fina : 482.4 gr
Peso de la arena : 3125.23 gr
Peso total : 3125.23 gr

Tamices ASTM	Abertura en mm.	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% QUE PASA	DESCRIPCION Límites de Consistencia
3/12"	88.000	0.00			100.00	Lim. Líquido : 33.80
3"	75.000	0.00	0.00	0.00	100.00	Lim. Plástico : 26.30
2 1/2"	63.500	0.00	0.00	0.00	100.00	Ind. Plasticidad : 7.50
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00	
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00	Clasificación de Suelos
1"	25.000	0.00	0.00	0.00	100.00	Grava (%) : 0.0
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.00	100.00	Arena (%) : 100.0
1/2"	12.500	0.00	0.00	0.00	100.00	Mod. Placca (%) : -
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00	Pasa N°4 : 100.0
1/4"	6.250	0.00	0.00	0.00	100.00	Pasa N°10 : 97.2
N°4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00	Pasa N°40 : 90.6
N°10	2.000	13.80	2.82	2.82	97.18	Pasa N°200 : 54.4
N°16	1.100	6.30	1.31	4.13	95.87	D10 : -
N°20	0.840	5.20	1.08	5.20	94.80	D60 : 0.083
N°30	0.600	7.40	1.53	6.74	93.26	Cc : -
N°40	0.425	11.90	2.47	9.20	90.80	Cu : -
N°60	0.250	34.70	7.18	16.40	83.60	UCUS : 80
N°80	0.180	31.30	6.48	22.88	77.11	AASHTO : A-6
N°100	0.150	20.80	4.31	27.20	72.80	
N°140	0.105	42.50	8.81	36.01	63.99	
N°200	0.075	48.30	9.80	45.81	54.39	
Base		262.35	54.39	100.00	0.00	

Curva Granulométrica

EDGAR CHRISTIAN I. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993
RESPONSABLE DE LABORATORIO

VIR DR. CARLOS HUIZA COLO
JEFE DE LABORATORIO CIP37281
Laboratorio de Mecánica de Suelos
JEFATURA
UNIVERSIDAD NACIONAL "Jorge Basadre Grohmann"
TACNA

Laboratorio 6. Ensayo de Análisis Granulométrico. Calicata 02



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE - TACNA APLICANDO LA
MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS

REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACIÓN : C-1

LIMITES DE CONSISTENCIA
ASTM D 4318, AASHTO T 89

Determinación del Límite Plástico		MTSC E 111			
ENSAYO Nº		01	02	03	05
Recipiente Nº		T-7	T-8		
Peso Recipiente+Suelo Húmedo	gr.	23.93	21.28		
Peso Recipiente+Suelo Seco	gr.	21.27	19.03		
Peso de agua	gr.	2.66	2.25		
Peso Recipiente	gr.	11.00	10.37		
Peso de Suelo Seco	gr.	10.27	8.66		
Humedad	%	25.90	25.98		
Límite Plástico	%	25.94			

Determinación del Límite Líquido		MTSC E 110				
ENSAYO Nº		01	02	03	05	06
Recipiente Nº		T-1	T-2	T-3		
Número de Golpes		10	19	31		
Peso Recipiente+Suelo Húmedo	gr.	30.17	30.48	28.03		
Peso Recipiente+Suelo Seco	gr.	25.22	25.67	23.85		
Peso de agua	gr.	4.95	4.81	4.18		
Peso Recipiente	gr.	11.91	11.24	11.67		
Peso de Suelo Seco	gr.	14.21	14.43	12.78		
Humedad	%	34.83	33.33	32.71		
Límite Líquido	%	33.00				
Índice de Plasticidad	%	7.06				



EDGAR CHRISTIAN I. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

RESPONSABLE DE LABORATORIO

VºBº DR. CARLOS HUISA COOR



Laboratorio 7. Ensayo de Límites de Consistencia. Calicata 01



**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE - TACNA APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS

REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACIÓN : C-2

**LIMITES DE CONSISTENCIA
ASTM D 4318, AASHTO T 89**

Determinación del Límite Plástico MTSC E 111

ENSAYO N°	01	02	03	05
Recipiente N°	T-9	T-10		
Peso Recipiente+Suelo Húmedo	gr. 22.11	21.10		
Peso Recipiente+Suelo Seco	gr. 19.84	18.91		
Peso de agua	gr. 2.27	2.19		
Peso Recipiente	gr. 10.82	10.93		
Peso de Suelo Seco	gr. 9.02	7.98		
Humedad	% 25.17	27.44		
Límite Plástico				26.30

Determinación del Límite Líquido MTSC E 110

ENSAYO N°	01	02	03	05	06
Recipiente N°	T-4	T-5	T-6		
Número de Golpes	12	23	34		
Peso Recipiente+Suelo Húmedo	gr. 30.72	30.20	35.89		
Peso Recipiente+Suelo Seco	gr. 25.60	25.34	29.69		
Peso de agua	gr. 5.12	4.86	6.20		
Peso Recipiente	gr. 11.25	11.2	10.9		
Peso de Suelo Seco	gr. 14.35	14.14	18.79		
Humedad	% 35.68	34.37	33.00		
Límite Líquido				33.86	
Índice de Plasticidad				7.50	

GRÁFICO LIMITE LIQUIDO

ECV
EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993
RESPONSABLE DE LABORATORIO

X
VIR® DR. CARLOS HUIZA COOR.
JEFE DE LABORATORIO CIP 37293

Laboratorio 8. Ensayo de Límites de Consistencia. Calicata 02



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS
DE LA ZONA DE ITE – TACNA APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA
EN DIFERENCIAS FINITAS
REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACIÓN : C-1

**ENSAYO DE PESO ESPECIFICO DE LA GRAVA Y ARENA
NORMA ASTM C 127-128- AASTHO T 84-85**

GRAVA			
ITEM	unidades	DESCRIPCION	DATO
A	gr	Peso seco de la muestra	-
B	gr	Peso de la canastilla sumergido	-
C	gr	Peso de la canastilla + la muestra sumergido	-
D	gr	peso sumergido	-
E	gr	peso superficialmente seco	-
F	cm3	volumen de desplazado	-
G	%	porcentaje de absorcion	-
H	gr/cm3	peso especifico de la muestra	-

ARENA			
ITEM	unidades	DESCRIPCION	DATO
			K 0.9968
A	gr	peso seco de la muestra	163.8
B	gr	peso de la fiola + agua	646.8
C	°C	temperatura	22
D	gr	peso de la fiola +agua+ muestra	746.5
E	gr/cm3	peso especifico de la muestra	2.55

EDGAR CHRISTIAN I. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

RESPONSABLE DE LABORATORIO

VºBº DR. CARLOS HUISA CCG
JEFE DE LABORATORIO CIP37291



Laboratorio 9. Ensayo de Peso específico de grava y arena. Calicata 01



ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS
DE LA ZONA DE ITE – TACNA APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS
FINITAS
REGION : TACNA
PROVINCIA : JORGE BASADRE
DISTRITO : ITE
UBICACIÓN : C-2

**ENSAYO DE PESO ESPECIFICO DE LA GRAVA Y ARENA
NORMA ASTM C 127-128- AASTHO T 84-85**

GRAVA			
ITEM	unidades	DESCRIPCION	DATO
A	gr	Peso seco de la muestra	-
B	gr	Peso de la canastilla sumergido	-
C	gr	Peso de la canastilla + la muestra sumergido	-
D	gr	peso sumergido	-
E	gr	peso superficialmente seco	-
F	cm3	volumen de desplazado	-
G	%	porcentaje de absorcion	-
H	gr/cm3	peso especifico de la muestra	-

ARENA			
ITEM	unidades	DESCRIPCION	DATO
			K 0.9968
A	gr	peso seco de la muestra	163.27
B	gr	peso de la fiola + agua	676.9
C	°C	temperatura	22
D	gr	peso de la fiola +agua+ muestra	775.6
E	gr/cm3	peso especifico de la muestra	2.52

EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993
RESPONSABLE DE LABORATORIO

VºBº DR. CARLOS HUISA COOR
JEFE DE LABORATORIO CIR37291





UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA - ESCUELA DE INGENIERIA DE MINAS
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA C-01

ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN
 LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE - TACNA APLICANDO
 LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS

UBICACIÓN : COORDENADAS (WGS-84) E290071 N8020779

PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.0	R	Suelos conformados por arenas superficiales, limos de color beige claro y material orgánico.
0.25	SC	Arenas arcillosas (SC) de de tonalidad marrón (carta de colores Munsell 4/3 carta 7.5 YR).
0.5		La fracción fina presenta plasticidad. Tiene moderado contenido de humedad 32.66 %.
0.75		Su compactación es de baja a moderada. El tamaño máximo de gravas es 4.75 mm.
1.0		

ESCALA 1:20

EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
 ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
 Reg. CIP 156993
 RESPONSABLE DE LABORATORIO

V° B° DR. CARLOS HUIZA COLO
 JEFE DE LABORATORIO CIP 37291



Laboratorio 11. Perfil Estratigráfico. Calicata 01



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA - ESCUELA DE INGENIERIA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA C-02

ESTUDIO : ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN
LOS SUELOS DE LA ZONA DE ITE - TACNA APLICANDO
LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS

UBICACIÓN : COORDENADAS (WGS-84) E290082 N8020830

PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.0	R	Suelos conformados por arenas superficiales, limos de color beige claro y material orgánico.
0.25	SC	Arenas arcillosas (SC) de tonalidad marrón (carta de colores Munsell 4/3 carta 7.5 YR).
0.5		La fracción fina presenta plasticidad. Tiene moderado contenido de humedad 27.21 %.
0.75		Su compacidad es de baja a moderada. El tamaño máximo de gravas es 4.75 mm.
1.0		

ESCALA 1:20

EDGAR CRISTIAN J. TESNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993
RESPONSABLE DE LABORATORIO

V° B° DR. CARLOS HUERA EGOR
JEFE DE LABORATORIO CIP 72281

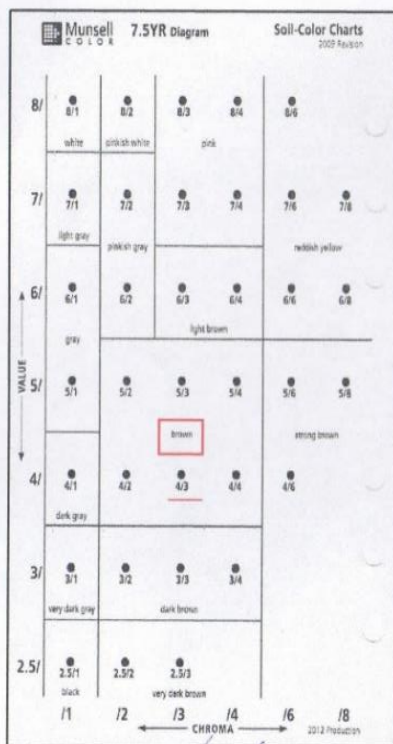


Laboratorio 12. Perfil Estratigráfico. Calicata 02



IDENTIFICACIÓN DE TONALIDAD DEL SUELO CON CARTAS DE COLORES MUNSELL

MUESTRAS DE SUELOS DE C-01 Y C-02 COLOR MARRÓN



EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
 ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
 Reg. CIP 156993

RESPONSABLE DE LABORATORIO



VºBº DR. CARLOS HUISA CCOPI
 JEFE DE LABORATORIO CIP 3729



Laboratorio 13. Identificación de tonalidad de suelos con cartas de colores

Nonell

C-1

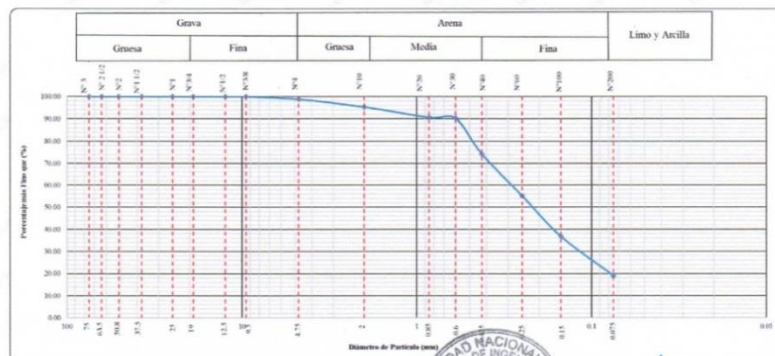
ENSAYO DE CLASIFICACIÓN DE UNA MUESTRA DE SUELO – SUCS Y AASHTO


INFORME No : 003-2019-LG&MR-FIM-UNA-PUNO.
 REFERENCIA : ASTM D 2487-69
 FECHA DE EMISIÓN: 15 DE ENERO DEL 2019.
 SOLICITADO POR : BACH. GUADALUPE SORAYDA CALAMULLO ARCAAYA
 PROYECTO : TESIS - ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA ITE TACNA, APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS.
 UBICACIÓN : ZONA ITE, PROVINCIA JORGE BASADRE - TACNA - PERÚ.
 MUESTRA : C-1, UTM WGS 84 N:8020779, E:290071
 TÉCNICO : ING. SC. OSCAR CAHUANA CONDORI & ING. SC. IVAN LAURA NINA.
 RESPONSABLE : ING. OWAL A. VELASQUEZ VIZA.

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2487-69, obteniéndose los siguientes resultados:

TAMIZ	TAMIZ	PESOS DE MUESTRA RETENIDA	PASA	PASANTE	RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)
PULG	75	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
2 1/2	63.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
2	50.8	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1 1/2	37.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1	25	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
3/4	19	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1/2	12.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
3/8	9.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
4	4.75	3.31	98.82	98.82	1.18	1.18
10	2	9.77	95.33	95.33	3.49	4.67
20	0.85	13.10	90.65	90.65	4.68	9.35
30	0.6	1.04	90.28	90.28	0.37	9.72
40	0.425	45.10	74.17	74.17	16.11	25.83
60	0.25	53.18	55.18	55.18	18.99	44.82
100	0.15	51.79	36.68	36.68	18.50	63.32
200	0.075	49.54	18.99	18.99	17.69	81.01
BASE		53.16	0.00	0.00	18.99	100.00
TOTAL		279.99			100.00	

CURVA GRANULOMÉTRICA




Ing. Oscar A. Cahuana Condori
 J P LABORATORIO G Y M R
 CIP Nº 137178

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización del Laboratorio de Geotecnia & Mecánica de Rocas – UNA P. Página 2 de 11

Av. Floral N°1153
 Puno - Perú
<http://web.unap.edu.pe/>

Ciudad Universitaria – Pab. Ing. De Minas
 unaminas@gmail.com, ilaura.geo@gmail.com
 owalvelasquez@hotmail.com

Teléfono
 (+051) 366193
 (+051) 921 474 201

C-2

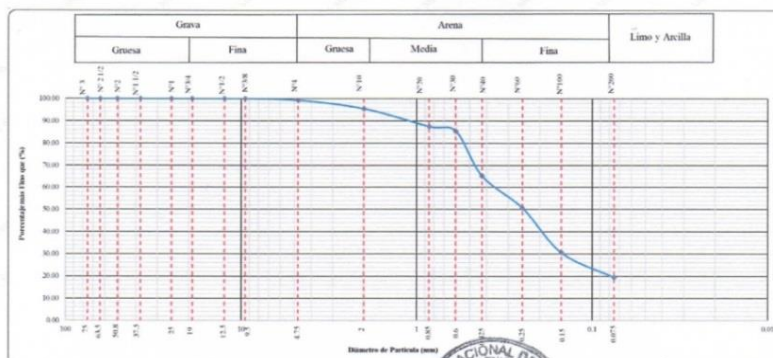
ENSAYO DE CLASIFICACIÓN DE UNA MUESTRA DE SUELO – SUCS Y AASHTO

INFORME No : 003-2019-LG&MR-FIM-UNA-PUNO.
 REFERENCIA : ASTM D 2487-69
 FECHA DE EMISIÓN: 15 DE ENERO DEL 2019.
 SOLICITADO POR : BACH. GUADALUPE SORAYDA CALAMULLO ARCAAYA
 PROYECTO : TESIS - ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA ITE TACNA, APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS.
 UBICACIÓN : ZONA ITE, PROVINCIA JORGE BASADRE - TACNA - PERÚ.
 MUESTRA : C-2, UTM WGS 84 N:8020830, E:290082
 TÉCNICO : ING. SC. OSCAR CAHUANA CONDORI & ING. SC. IVAN LAURA NINA.
 RESPONSABLE : ING. OWAL A. VELASQUEZ VIZA.

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2487-69, obteniéndose los siguientes resultados:

TAMIZ	TAMIZ	PESOS DE MUESTRA RETENIDA	PASA	PASANTE	RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)
PULG	75	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
2 1/2	63.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
2	50.8	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1 1/2	37.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1	25	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
3/4	19	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1/2	12.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
3/8	9.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
4	4.75	2.50	99.25	99.25	0.75	0.75
10	2	12.45	95.51	95.51	3.74	4.49
20	0.85	26.48	87.57	87.57	7.95	12.43
30	0.6	6.70	85.55	85.55	2.01	14.45
40	0.425	67.89	65.18	65.18	20.38	34.82
60	0.25	48.11	50.74	50.74	14.44	49.26
100	0.15	67.20	30.57	30.57	20.17	69.43
200	0.075	37.10	19.43	19.43	11.14	80.57
BASE		64.75	0.00	0.00	19.43	100.00
TOTAL		333.18				

CURVA GRANULOMÉTRICA

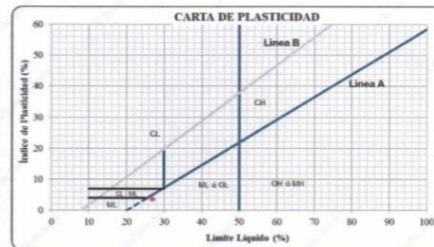
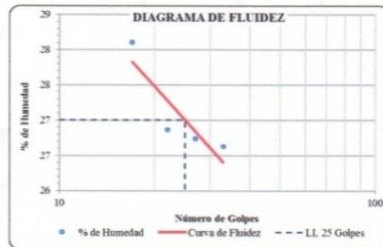



 Ing. Oscar A. Cahuana Condori
 J.P. LABORATORIO G Y M R
 CIP Nº 137178



LÍMITES DE CONSISTENCIA

LÍMITE LÍQUIDO (ASTM-D4318 00)				LÍMITE PLÁSTICO (ASTM-D4318 00)						
N° de Tara	T-24	T-19	T-22	T-23	N° de Tara	M-2	M-10	M-3	Límite Líq. de LL (%)	27.00
Peso Suelo Húmedo + Tara (g)	39.29	38.22	42.78	39.39	Peso Suelo Húmedo + Tara (g)	8.46	8.38	8.46	Límite Plástico LP (%)	23.36
Peso de Suelo Seco + Tara (g)	34.58	33.98	37.60	34.89	Peso de Suelo Seco + Tara (g)	8.19	8.13	8.20	Índice de Plasticidad (I.P.)	3.64
Peso de Tara (g)	17.82	18.20	18.23	17.99	Peso de Tara (g)	7.03	7.07	7.08	Pasa tamiz N° 4 (75mm) (%)	98.82
Peso de Suelo Seco (g)	16.76	15.78	19.37	16.90	Peso de Suelo Seco (g)	1.16	1.06	1.12	Pasa tamiz N° 200 (0.080 mm) (%)	18.99
Peso de Agua (g)	4.71	4.24	5.18	4.50	Peso de Agua (g)	0.27	0.25	0.26	D ₆₀ (mm)	0.29
Contenido de Humedad (%)	28.10	26.87	26.74	26.63	Contenido de Humedad (%)	23.28	23.58	23.21	D ₃₀ (mm)	0.12
Número de Golpes	17	22	27	33					D ₁₀ (diámetro efectivo) (mm)	-
									Coefficiente de uniformidad (Cu)	-
									Grado de saturación (G _s)	-



Clasificación SUCS
Suelo de partículas gruesas. Suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio).
Arena limosa SM

Clasificación AASTHO
Material granular
Excelente a bueno como subgrado
A-2-4 Grava y arena arcillosa o limosa

INDICE DE GRUPO 0



A. Cahuana
Ing. Oscar A. Cahuana Condori
J.P. LABORATORIO G Y M R
CIP N° 137178

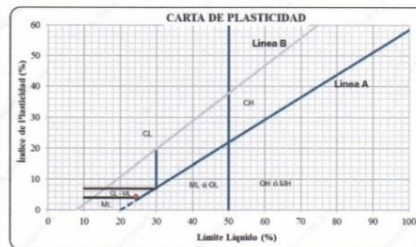
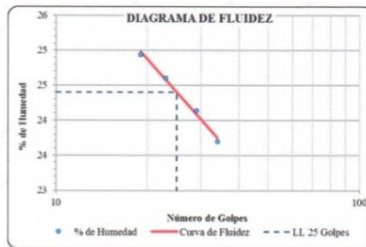
OBSERVACIÓN:

- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas.
- Prohibida su reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Geotecnia & Mecánica de Rocas.
- Los resultados no pueden ser utilizados como certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



LÍMITES DE CONSISTENCIA

LÍMITE LÍQUIDO (ASTM-D4318 00)					LÍMITE PLÁSTICO (ASTM-D4318 00)					
N° de Tara	T-24	T-19	T-22	T-23	N° de Tara	M-2	M-10	M-3	Límite Líquido L.L. (%)	24.40
Peso Suelo Humedo + Tara (g)	82.04	82.31	82.27	84.40	Peso Suelo Humedo + Tara (g)	8.45	8.89	9.15	Límite Plástico L.P. (%)	19.90
Peso de Suelo Seco + Tara (g)	78.84	79.06	78.49	80.66	Peso de Suelo Seco + Tara (g)	8.21	8.58	8.80	Índice de Plasticidad (I.P.)	4.50
Peso de Tara (g)	66.01	65.85	62.83	64.88	Peso de Suelo Seco (g)	7.02	7.02	7.02	Pasa tamiz N° 4 (5mm) (%)	99.25
Peso de Suelo Seco (g)	12.83	13.21	15.66	15.78	Peso de Suelo Seco (g)	1.19	1.56	1.78	Pasa tamiz N° 200 (0.080 mm) (%)	19.43
Peso de Agua (g)	3.20	3.25	3.78	3.74	Peso de Agua (g)	0.24	0.31	0.35	D60 (mm)	0.36
Contenido de Humedad (%)	24.94	24.60	24.14	23.70	Contenido de Humedad (%)	20.17	19.87	19.66	D30 (mm)	0.15
Número de Golpes	19	23	29	34					D60 (diámetro efectivo) (mm)	-
									Coefficiente de uniformidad (Cu)	-
									Grado de compactación (Cc)	-



Clasificación SUCS
Suelo de partículas gruesas. Suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio).
Arena arcilloso-limosa SC-SM

Clasificación AASTHO
Material granular
Excelente a bueno como subgrado
A-2-4 Grava y arena arcillosa o limosa
ÍNDICE DE GRUPO 0



Oscar A. Cahuana Condori
Ing. Oscar A. Cahuana Condori
J.P. LABORATORIO G Y M R
CIP N° 137178

OBSERVACIÓN:

- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas.
- Prohibida su reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Geotecnia & Mecánica de Rocas.
- Los resultados no pueden ser utilizados como certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

INFORME No : 003-2019-LG&MR-FIM-UNA-PUNO.
 REFERENCIA : ASTM D 2435-96
 FECHA DE EMISIÓN: 15 DE ENERO DEL 2019.
 SOLICITADO POR : BACH. GUADALUPE SORAYDA CALAMULLO ARCAÑA
 PROYECTO : TESIS - ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA ITE TACNA, APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS.
 UBICACIÓN : ZONA ITE, PROVINCIA JORGE BASADRE - TACNA - PERÚ.
 MUESTRA : C-1, UTM WGS 84 N:8020779, E:290071
 TÉCNICO : ING. SC. OSCAR CAHUANA CONDORI & ING. SC. IVAN LAURA NINA.
 RESPONSABLE : ING. OWAL A. VELASQUEZ VIZA.

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	1.98
Diámetro (cm)	5.00
Grav. Esp. Rel. Sol. (Gs) (Ss)	2.68

Humedad inicial (%)	23.39
Humedad Final (%)	19.75

ETAPA DE CARGA									
Carga Aplicada (Kg/cm²)	Lectura Final (mm)	Asent. (mm)	Altura			Densidad Seca (g/cm³)	Relación de Vacíos (e)	Deform. Vertical (%)	Coefic. De Consolid. (cm²/min)
			Final (mm)	Promedio (mm)	Drenada (mm)				
0.13	19.3600	0.000	19.840	19.840	9.920	1.550	0.728	0.000	
0.3	19.5320	0.172	19.668	19.754	9.877	1.564	0.713	0.867	0.02745
0.5	19.7480	0.388	19.452	19.560	9.780	1.581	0.695	1.956	0.01812
1.0	20.1150	0.755	19.085	19.269	9.634	1.612	0.663	3.805	0.06530
2.0	20.6900	1.330	18.510	18.798	9.399	1.662	0.613	6.704	0.08287
4.1	21.4537	2.094	17.746	18.128	9.064	1.733	0.546	10.553	0.09249
8.1	22.2275	2.868	16.973	17.359	8.680	1.812	0.479	14.453	0.06746
	22.2275	2.868	16.973	16.973	8.486	1.812	0.479	14.453	0.01773

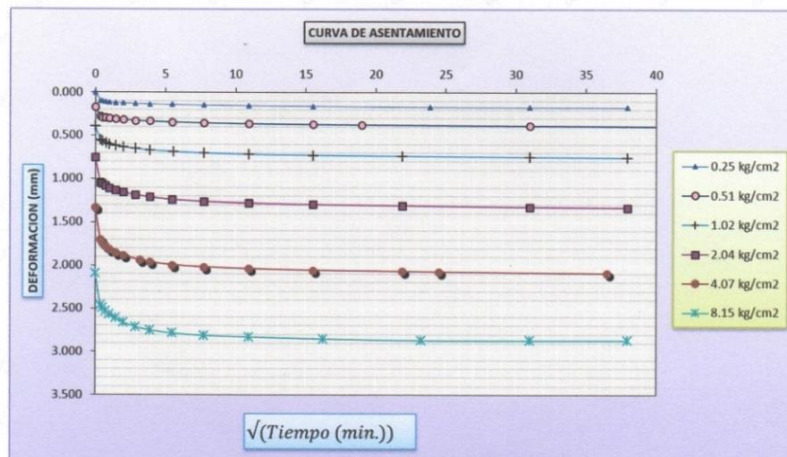
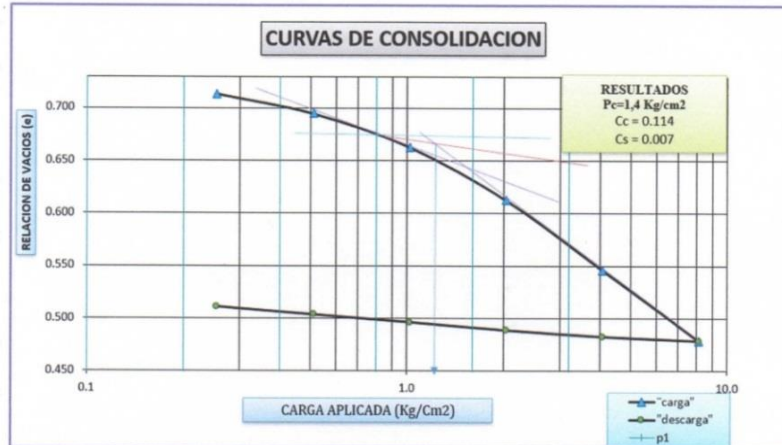
ETAPA DE DESCARGA									
Carga Aplicada (Kg/cm²)	Lectura Final (mm)	Asent. (mm)	Altura			Densidad Seca (g/cm³)	Relación de Vacíos (e)	Deform. Vertical (%)	Coefic. De Consolid. (cm²/min)
			Final (mm)	Promedio (mm)	Drenada (mm)				
0.0	21.0575	2.868	16.973	16.973	8.486	1.812	0.479	14.453	
8.1	21.0575	2.868	16.973	16.973	8.486	1.812	0.479	14.453	—
4.1	21.0120	2.822	17.018	16.995	8.498	1.807	0.483	14.224	—
2.0	20.9410	2.751	17.089	17.054	8.527	1.800	0.489	13.866	—
1.0	20.8535	2.664	17.177	17.133	8.566	1.791	0.496	13.425	—
0.5	20.7690	2.579	17.261	17.219	8.609	1.782	0.504	12.999	—
0.3	20.6830	2.493	17.347	17.304	8.652	1.773	0.511	12.566	—

OBS: EL MUESTREO FUE REALIZADO POR EL SOLICITANTE.

DATOS DE LA MUESTRA	
Gravedad de Sólidos (gr/cm³)	2.680
Peso espécimen (gr)	74.54
Densidad Seca (gr/cm³)	1.55
Diámetro (cm)	5.00
Altura H ₁ (cm)	1.984
área (cm²)	19.64
volumen (cm³)	38.97
densidad húmeda (gr/cm³)	1.91
peso de los sólidos (gr)	60.41
altura de los sólidos H ₂ (cm)	1.15
área final (cm²)	0.73
Variación en la altura de la muestra del principio al final ΔH (cm)	0.287
Altura final de la muestra H ₂ (cm)	1.697
efinal	0.479




 Ing. Oscar A. Cahuana Condori
 P. LABORATORIO G. Y M. R.
 CIP N° 137178



Oscar A. Cahuana Condori
 Ing. Oscar A. Cahuana Condori
 J.P. LABORATORIO G Y M R
 CIP N° 137178

ETAPA DE CARGA											
Tiempo (min)	0.25 kg/cm ²	Tiempo (min)	0.51 kg/cm ²	Tiempo (min)	1.02 kg/cm ²	Tiempo (min)	2.04 kg/cm ²	Tiempo (min)	4.07 kg/cm ²	Tiempo (min)	8.15 kg/cm ²
0	19.3600	0	19.5320	0	19.7480	0	20.1150	0	20.6900	0	21.4537
0.13	19.4575	0.13	19.6350	0.13	19.9125	0.13	20.4025	0.13	21.0625	0.13	21.8200
0.25	19.4625	0.25	19.6475	0.25	19.9275	0.25	20.4200	0.25	21.1025	0.25	21.8525
0.50	19.4700	0.50	19.6525	0.60	19.9450	0.50	20.4425	0.50	21.1400	0.50	21.8875
1.00	19.4740	1.00	19.6580	1.00	19.9600	1.00	20.4675	1.00	21.1750	1.00	21.9250
2.00	19.4800	2.00	19.6675	2.00	19.9770	2.00	20.4915	2.00	21.2115	2.00	21.9700
4.00	19.4850	4.00	19.6750	4.00	19.9925	4.00	20.5175	4.00	21.2480	4.00	22.0225
8.00	19.4910	8.00	19.6850	8.00	20.0112	8.00	20.5460	10.00	21.3000	8.00	22.0720
15.00	19.4955	15.00	19.6925	15.00	20.0275	15.00	20.5725	15.00	21.3225	15.00	22.1100
30.00	19.5015	30.00	19.7025	31.00	20.0452	30.00	20.5985	30.00	21.3560	30.00	22.1445
60.00	19.5070	60.00	19.7115	60.00	20.0625	60.00	20.6210	60.00	21.3800	60.00	22.1725
120.00	19.5125	120.00	19.7200	120.00	20.0775	120.00	20.6385	120.00	21.3990	120.00	22.1885
240.00	19.5180	240.00	19.7280	240.00	20.0880	240.00	20.6535	240.00	21.4160	263.00	22.2100
570.00	19.5275	360.00	19.7325	480.00	20.0975	480.00	20.6675	480.00	21.4300	540.00	22.2275
960.00	19.5300	960.00	19.7410	960.00	20.1075	960.00	20.6825	600.00	21.4350	960.00	22.2275
1440.00	19.5320	1080.00	19.7480	1440.00	20.1150	1440.00	20.6900	1332.00	21.4537	1440.00	22.2275

ETAPA DE DESCARGA						
Tiempo (min)	0.25 kg/cm ²	0.51 kg/cm ²	1.02 kg/cm ²	2.04 kg/cm ²	4.07 kg/cm ²	8.15 kg/cm ²
0	20.7690	20.8535	20.9410	21.0120	21.0575	21.0575
0.13	20.7225	20.8200	20.8850	20.9625	21.0228	21.0575
0.25	20.7215	20.8165	20.8825	20.9600	21.0175	21.0575
0.5	20.7195	20.8075	20.8790	20.9565	21.0165	21.0575
1	20.7150	20.7975	20.8745	20.9525	21.0150	21.0575
2	20.7080	20.7975	20.8675	20.9480	21.0135	21.0575
4	20.6970	20.7780	20.8600	20.9435	21.0125	21.0575
8	20.6830	20.7690	20.8535	20.9410	21.0120	21.0575




 Ing. Oscar A. Cahua Condori
 J.P. LABORATORIO G Y M R
 CIP Nº 137178

INFORME No : 003-2019-LG&MR-FIM-UNA-PUNO.
 REFERENCIA : ASTM D 2435-96
 FECHA DE EMISIÓN: 15 DE ENERO DEL 2019.
 SOLICITADO POR : BACH. GUADALUPE SORAYDA CALAMULLO ARCAAYA
 PROYECTO : TESIS - ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN LOS SUELOS DE LA ZONA ITE TACNA,
 APLICANDO LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN DIFERENCIAS FINITAS.
 UBICACIÓN : ZONA ITE, PROVINCIA JORGE BASADRE - TACNA - PERÚ.
 MUESTRA : C-2, UTM WGS 84 N:8020830, E:290082
 TÉCNICO : ING. SC. OSCAR CAHUANA CONDORI & ING. SC. IVAN LAURA NINA.
 RESPONSABLE : ING. OWAL A. VELASQUEZ VIZA.

DATOS DEL ESPECIMEN			Humedad inicial (%)	
Altura (cm)	1.98		Humedad inicial (%)	55.65
Diametro (cm)	5.00		Humedad Final (%)	19.45
Grav. Esp.Rel. Sol.(Gs) (Se)	2.57			

ETAPA DE CARGA									
Carga Aplicada (Kg/cm ²)	Lectura Final (mm)	Asent. (mm)	Altura			Densidad Seca (g/cm ³)	Relación de Vacíos (e)	Deform. Vertical (%)	Coefic. De Consolida. (cm ² /min)
			Final (mm)	Promedio (mm)	Drenada (mm)				
0.25	1.4580	0.000	19.800	19.800	9.900	1.331	0.934	0.000	
0.5	1.6075	0.150	19.651	19.725	9.863	1.341	0.919	0.755	0.02948
1.0	1.7635	0.306	19.495	19.573	9.786	1.351	0.904	1.543	0.00898
2.0	2.2462	0.788	19.012	19.253	9.627	1.386	0.857	3.981	0.09128
4.1	3.6530	2.195	17.605	18.308	9.154	1.496	0.719	11.086	0.06879
8.1	5.1500	3.692	16.108	16.857	8.428	1.636	0.573	18.646	0.03110
16.3	6.5050	5.047	14.753	15.431	7.715	1.786	0.441	25.490	0.01150
32.6	7.7075	6.250	13.551	14.152	7.076	1.944	0.323	31.563	0.01233

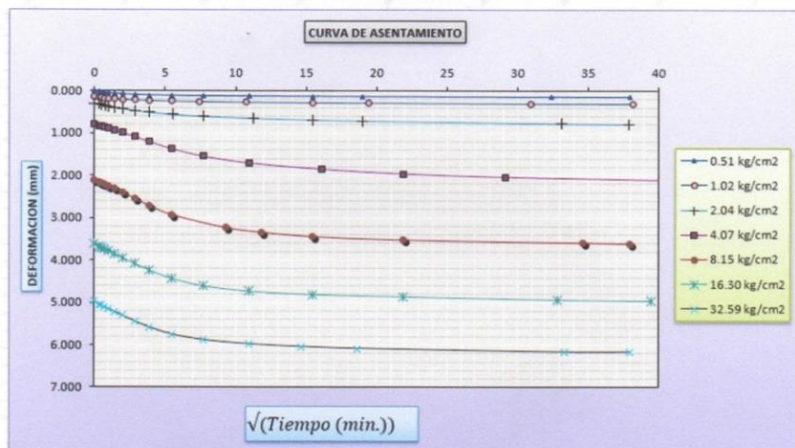
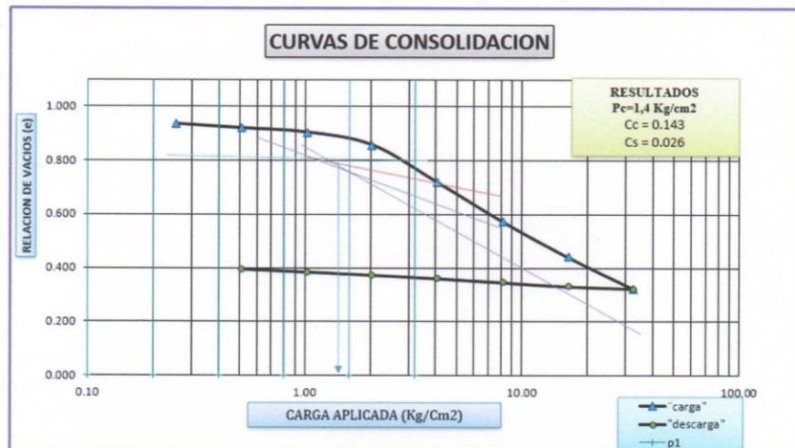
ETAPA DE DESCARGA									
Carga Aplicada (Kg/cm ²)	Lectura Final (mm)	Asent. (mm)	Altura			Densidad Seca (g/cm ³)	Relación de Vacíos (e)	Deform. Vertical (%)	Coefic. De Consolida. (cm ² /min)
			Final (mm)	Promedio (mm)	Drenada (mm)				
32.6	7.7075	6.250	13.551	14.152	7.076	1.944	0.323	31.563	
16.3	7.6275	6.170	13.631	13.591	6.795	1.933	0.331	31.159	---
8.1	7.4767	6.019	13.781	13.706	6.853	1.912	0.346	30.397	---
4.1	7.3300	5.872	13.928	13.855	6.927	1.892	0.360	29.657	---
2.0	7.1990	5.741	14.059	13.994	6.997	1.874	0.373	28.995	---
1.0	7.0812	5.623	14.177	14.118	7.059	1.858	0.384	28.400	---
0.5	6.9712	5.513	14.287	14.232	7.116	1.844	0.395	27.844	---

OBS: EL MUESTREO FUE REALIZADO POR EL SOLICITANTE.

DATOS DE LA MUESTRA	
Gravedad de Sólidos (gr/cm ³)	2.573
Peso espécimen (gr)	80.52
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.33
Diametro (cm)	5.00
Altura (cm)	1.980
area (cm ²)	19.63
volumen (cm ³)	38.88
densidad húmeda (gr/cm ³)	2.07
peso de los sólidos (gr)	81.73
altura de los sólidos H _s (cm)	1.02
inicial	0.93
Variación en la altura de la muestra del principio al final ΔH (cm)	0.925
Altura final de la muestra H _f (cm)	1.355
efinal	0.323




 Ing. Oscar A. Cahuana Condori
 J.P. LABORATORIO G Y M R
 CIP N° 137178





Ing. Oscar A. Cahuana Condori
 J.P. LABORATORIO G Y M R



UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL
ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE GEOTECNIA & MECÁNICA DE ROCAS



ETAPA DE CARGA													
Tiempo (min)	0.51 kg/cm ²	Tiempo (min)	1.02 kg/cm ²	Tiempo (min)	2.04 kg/cm ²	Tiempo (min)	4.07 kg/cm ²	Tiempo (min)	8.15 kg/cm ²	Tiempo (min)	16.30 kg/cm ²	Tiempo (min)	32.59 kg/cm ²
0	1.4580	0	1.6075	0	1.7635	0	2.3250	0	3.6530	0	5.1530	0	6.5050
0.13	1.4850	0.13	1.6275	0.13	1.7780	0.13	2.3700	0.13	3.7125	0.13	5.2150	0.13	6.5900
0.25	1.4925	0.25	1.6310	0.25	1.7935	0.25	2.3850	0.25	3.7300	0.25	5.2375	0.25	6.6025
0.50	1.5000	0.50	1.6365	0.60	1.8135	0.50	2.4025	0.50	3.7525	0.50	5.2650	0.50	6.6425
1.00	1.5100	1.00	1.6450	1.00	1.8300	1.00	2.4275	1.00	3.7925	1.00	5.3125	1.00	6.6900
2.00	1.5230	2.00	1.6555	2.00	1.8523	2.00	2.4712	2.00	3.8480	2.00	5.3850	2.00	6.7575
4.00	1.5380	4.00	1.6690	4.00	1.8837	4.00	2.5325	4.00	3.9360	4.00	5.4875	4.00	6.8500
8.00	1.5530	8.00	1.6825	8.00	1.9150	8.00	2.6225	8.00	4.0775	8.00	5.6160	8.00	6.9800
15.00	1.5635	15.00	1.6935	15.00	1.9675	15.00	2.7387	15.00	4.2525	15.00	5.7725	15.00	7.1212
30.00	1.5725	30.00	1.7050	31.00	2.0180	30.00	2.9100	30.00	4.4660	30.00	5.9700	30.00	7.2900
60.00	1.5800	55.00	1.7155	60.00	2.0625	60.00	3.0875	86.00	4.7675	60.00	6.1510	60.00	7.4225
120.00	1.5865	115.00	1.7275	127.00	2.1075	120.00	3.2429	141.00	4.8776	120.00	6.2720	120.00	7.5187
240.00	1.5925	240.00	1.7385	240.00	2.1465	259.00	3.3885	240.00	4.9800	240.00	6.3545	214.00	7.5800
360.00	1.5960	377.00	1.7450	360.00	2.1700	481.00	3.5000	480.00	5.0600	480.00	6.4045	347.00	7.6250
1050.00	1.6050	960.00	1.7580	1097.0	2.2305	850.00	3.5750	1200.00	5.1300	1080.00	6.4800	1112.00	7.7075
1440.00	1.6075	1458.0	1.7635	1439.0	2.2462	1680.00	3.6530	1440.00	5.1500	1560.00	6.5050	1440.00	7.7075

ETAPA DE DESCARGA						
Tiempo (min)	0.51 kg/cm ²	1.02 kg/cm ²	2.04 kg/cm ²	4.07 kg/cm ²	8.15 kg/cm ²	16.30 kg/cm ²
0	7.9625	7.1850	7.3150	7.4525	7.5850	7.6775
0.13	7.0587	7.1825	7.3100	7.4467	7.5800	7.6750
0.25	7.0525	7.1775	7.3035	7.4375	7.5725	7.6675
0.5	7.0462	7.1687	7.2925	7.4250	7.5575	7.6575
1	7.0312	7.1525	7.2725	7.4037	7.5387	7.6425
2	7.0090	7.1250	7.2437	7.3725	7.5075	7.6287
4	6.9712	7.0812	7.1990	7.3300	7.4767	7.6275
8	6.9712	7.0812	7.1990	7.3300	7.4767	7.6275



A. Cahuana
Ing. Oscar A. Cahuana Condori
J.P. LABORATORIO G Y MR
CIP N° 137178

Anexo 4. Anexo de fotografía



Fotografía 1. Ubicación de calicatas en la zona de estudio



Fotografía 2. Identificación de estratos



Fotografía 3. Calicata N° 01



Fotografía 4. Calicata N° 02



Fotografía 5. Identificación de tonalidad de suelos con cartas de colores Nonell



Fotografía 6. Ensayo de Densidad In Situ (Cono de Arena)