

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
**Determinación de las isócronas de consolidación
unidimensional para cimentación en arcillas del
Centro Educativo de Moya, Distrito de
Quinua-Ayacucho**

Presentado por : Edgar ONCEBAY CUYA

Acesor : Mg. Ing. Ángel Hugo VILCHEZ PEÑA

AYACUCHO - PERÚ

2018

Presentación

La presente tesis es el resultado del conocimiento adquirido durante mi periodo de estudiante en la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, donde me impartieron conocimientos necesarios y formación para afrontar las diferentes situaciones que se presentan en la carrera de la ingeniería. La misma contiene las investigaciones, ensayos y resultados realizados durante el periodo 2016-2017.

Edgar Oncebay Cuya

edgar_1623@hotmail.com

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

Ayacucho, Enero del 2018.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a las personas que me dieron herramientas para defenderme en la vida, mis padres Silverio y Luisa, mis hermanos, familias, amigos y tutores.

Agradecimientos

Primeramente agradezco a Dios por haberme regalado la vida y una maravillosa familia.

Agradezco a mis padres Silverio y Luisa por su paciencia y apoyo durante toda esta etapa de mi vida.

A mis hermanos Yanina, Wilber y Edison por el apoyo incondicional.

Al MSc. Ángel Hugo Vélchez Peña, amigo y asesor de esta tesis, por su orientación y apoyo constante, en su elaboración.

A los Docentes y Amigos que en cada experiencia de mi vida ellos van aportando en mi.

Finalmente, a la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, nuestra alma máter, por acogerme dentro de sus aulas durante mis años de estudiante.

Resumen

En la presente tesis se ha determinado las isócronas de consolidación unidimensional (1D) del suelo arcilloso del Centro Educativo de Moya, por medio de la teoría de consolidación. Los ensayos de consolidación permitieron determinar los parámetros de consolidación (coeficiente de consolidación vertical C_v por método de Casagrande, coeficiente de compresibilidad m_v , permeabilidad y presión de pre consolidación σ'_p por el método de Schmertmann), dichos datos son necesarios para la solución de la ecuación que define la consolidación 1D, y a su vez por medio de métodos analíticos y diferencias finitas apoyados en herramientas computacionales que facilitan en el procesamiento de los datos obtenidos en laboratorio. Con los resultados obtenidos se evalúa los asentamientos que podría generarse en el suelo de fundación del C.E. de Moya. A su vez las isócronas de consolidación permiten evaluar la distribución del esfuerzo efectivo, en todo el estrato de la arcilla durante el proceso de consolidación.

Para resolver la ecuación que rige la consolidación unidimensional, se ha elaborado un programa en el software Matlab R2016a, la misma que se basó en los métodos analíticos y diferencias finitas.

Índice general

Portada	
Presentación	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Índice General	v
Índice de Cuadros	IX
Índice de Figuras	XI
Momenclatura	XVII
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	1
1.2.1 Problema Principal	2
1.2.2 Problema específico	2
1.3 Justificación e importancia	3
1.4 Objetivos	3

1.4.1	Objetivos generales	3
1.4.2	Objetivos específicos	4
1.5	Hipótesis	4
1.5.1	Hipótesis generales	4
1.5.2	Hipótesis específicos	4
1.6	Organización del estudio	5
2	Estado del arte para las isócronas de consolidación	7
2.1	Naturaleza de los suelos arcillosos	8
2.1.1	Origen de las arcillas	8
2.1.2	Estructura de las arcillas	9
2.1.3	Clasificación de las arcillas	12
2.2	Caracterización geotécnica de suelo arcilloso	14
2.2.1	Límites de Atterberg	14
2.2.2	Gravedad específica de los sólidos (Gs)	18
2.2.3	Contenido de humedad del suelo (ω)	20
2.2.4	Peso específico (γ_w)	21
2.2.5	Clasificación de los suelos de grano fino	22
2.3	Consolidación en suelos finos	24
2.3.1	Teoría de Terzaghi para consolidación unidimensional (1D).	25
2.4	Isócronas de consolidación unidimensional (1D)	28
2.4.1	Deducción de la ecuación de la velocidad de consolidación unidimensional (1D)	30
2.4.2	Condiciones iniciales y de frontera para las isócronas de consolidación (1D)	38
2.4.3	Solución de la ecuación de comportamiento.	40
2.5	Parámetros de consolidación unidimensional	55

2.5.1	Ensayo de consolidación unidimensional (1D)	55
2.5.2	Parámetros de compresibilidad en consolidación unidimensional (1D)	56
2.6	Normatividad en ensayos de consolidación unidimensional	67
3	Metodología para las isócronas de consolidación de la arcilla de Moya	68
3.1	Ubicación de la zona en estudio.	68
3.2	Equipos para la caracterización geotécnica.	69
3.3	Equipos para ensayos de consolidación.	71
3.4	Herramientas para las isócronas de consolidación.	72
3.5	Metodología para la caracterización geotécnica.	73
3.5.1	Toma de muestras	73
3.5.2	Contenido de humedad (ω)	74
3.5.3	Limite líquido (LL)	74
3.5.4	Limite plástico (LP)	76
3.5.5	Límite de contracción (LC)	77
3.5.6	Gravedad específica (Gs)	78
3.5.7	Clasificación de material fino	80
3.6	Metodología para el ensayo de consolidación	82
3.6.1	Preparación de la muestra	82
3.6.2	Colocación de la muestra en la cámara de consolidación.	82
3.6.3	Procedimiento del ensayo	84
3.6.4	Procedimiento para determinar los parámetros de consolidación	86
3.6.5	Procedimiento para las isócronas de consolidación con Matlab	
	R2016a	92
3.6.6	Diagrama de flujo para las isócronas de consolidación con Matlab	
	R2016a	96
4	Resultados y discusión	99

4.1	Geología del Centro Poblado de Moya.	99
4.2	Caracterización geotécnica de la arcilla del C.E. de Moya.	101
4.3	Determinación de los parámetros de consolidación unidimensional (1D). . .	105
4.4	Resultado de las isócronas de consolidación.	108
5	Conclusiones	119
6	Recomendaciones	123
	Bibliografía	125
A	Resultados en Hojas de cálculo Excel	127
B	Sub-rutina “Isocronas”	152
C	Método de ajuste para Cv	156
D	Planos	157

Índice de cuadros

Cuadro 2.1 :	Grupo mineral de las arcillas (Sposito, 2008)	11
Cuadro 2.2 :	Valores de los límites de Atterberg para los minerales de arcilla (Mitchell, 2005)	16
Cuadro 2.3 :	Actividad de las arcillas-(Duque Escobar, 2016)	17
Cuadro 2.4 :	Clasificación de suelos expansivos (RNE E.050)	18
Cuadro 2.5 :	Gravedad específica de los minerales de la arcilla (Das, 2013) .	19
Cuadro 2.6 :	Tamaños adecuados para determinar la humedad natural (Bowles, 1981)	20
Cuadro 2.7 :	Valores de coeficiente de consolidación vertical (cm ² /seg) (Lambe, 1972)	60
Cuadro 2.8 :	Compresibilidad y coeficiente de compresibilidad volumétrica (Rodríguez Serquén, 2016)	61
Cuadro 2.9 :	Rangos de la permeabilidad hidráulica para identificar los suelos (Das, 2013)	61
Cuadro 2.10 :	Compresión y expansión de suelos naturales (Das, 2013)	65
Cuadro 3.1 :	Datos obtenidos del ensayo de consolidación	87
Cuadro 3.2 :	Hoja de cálculo para determinar relación de vacíos (e) y coeficiente de compresibilidad volumétrica m_v	91
Cuadro 4.1 :	Resumen del resultado del tamizado de las muestras	101
Cuadro 4.2 :	Resumen de contenido de humedad natural	102

Cuadro 4.3 :	Resumen de contenido de límite líquido	102
Cuadro 4.4 :	Resumen de contenido de límite Plástico	102
Cuadro 4.5 :	Valores de índice de plasticidad	103
Cuadro 4.6 :	Clasificación según SUCS y AASHTO	103
Cuadro 4.7 :	Resumen de la caracterización geotécnica de la arcilla de Moya.	104
Cuadro 4.8 :	Resultados del ensayo de consolidación para ensayo-01	105
Cuadro 4.9 :	Resultados de la humedad y peso específico inicial y final del ensayo	105
Cuadro 4.10 :	Valores obtenidos de C_v de los datos obtenidos del ensayo de consolidación.	106
Cuadro 4.11 :	Valores de compresibilidad volumétrica (m_v) y relación de vacíos (e).	106
Cuadro 4.12 :	Resumen de los parámetros de consolidación.	107
Cuadro 4.13 :	Valores exportados de isócronas de Matlab R2016a por método analítico.	111
Cuadro 4.14 :	Valores exportados de isócronas de Matlab R2016a por método implícito	112
Cuadro 4.15 :	Valores exportados de isócronas de Matlab R2016a por método de Crank- Nicholsón	113
Cuadro 4.16 :	Tiempo de consolidación resueltos en Matlab R2016a, para 210 cm de altura	114

Índice de figuras

Figura 2.1:	Estructura molecular de láminas silicas (Sposito, 2008)	9
Figura 2.2:	Estructura molecular de láminas alumínicas (Sposito, 2008)	10
Figura 2.3:	Estructura molecular de las filosilicatos (Sposito, 2008)	11
Figura 2.4:	Definición de los límites de Atterberg (Das, 2013)	14
Figura 2.5:	Copa de Casagrande-(Elaboración propia)	15
Figura 2.6:	Carta de plasticidad (Norma NTP, 339.134)	22
Figura 2.7:	Dispositivo para demostrar en forma mecánica como se produce la consolidación Terzaghi (1973)	25
Figura 2.8:	Dispositivo para demostrar en forma mecánica como se produce la consolidación (ELE Internacional Ltda., 1993)	26
Figura 2.9:	Estados del suelo en un proceso de consolidación-(Das, 2013)	27
Figura 2.10:	Diagrama que ilustra la consolidación de una capa compresible de arcilla (Terzaghi, 1973)	29
Figura 2.11:	Deposito de suelo drenado por ambas caras y distribución de presiones efectivas y neutral (Eulalio, 2005)	30
Figura 2.12:	Consolidación vertical de una capa de suelo (Berry, 1993)	31
Figura 2.13:	Diferencial de una partícula de suelo (Berry, 1993)	31
Figura 2.14:	Comportamiento de m_v y a_v en función a esfuerzo vs deformación y relación de vacíos respectivamente (Berry, 1993)	35
Figura 2.15:	Condiciones hidráulicas de borde para una capa semi-abierta (Terzaghi, 1973)	38

Figura 2.16: Condiciones hidráulicas de borde para una capa abierta en ambos extremos (Terzaghi, 1973)	39
Figura 2.17: Isócronas de consolidación para drenaje simple (Berry, 1993)	46
Figura 2.18: Isócronas de consolidación para drenaje Doble (Berry, 1993)	47
Figura 2.19: Cánara para consolidación unidimensional (Das, 2013)	55
Figura 2.20: Compresión Inicial, Primaria y Secundaria de consolidación por Método de Taylor (Whitlow, 1976)	56
Figura 2.21: Compresión Inicial, Primaria y Secundaria de consolidación por Método de Casagrande (Whitlow, 1976)	57
Figura 2.22: Curva teórica de consolidación por el método de logaritmo de tiempo (Whitlow, 1976)	58
Figura 2.23: Curva teórica de consolidación por el método de raíz cuadrada del tiempo (Whitlow, 1976)	59
Figura 2.24: Representación de un elemento de suelo: a) antes de la consolidación, b) después de la consolidación (Berry, 1993)	60
Figura 2.25: Tramo de deformación elástica, inelástica y curva $e - \log \sigma'$ - (Rodríguez Serquén, 2016)	62
Figura 2.26: Definición de la relación de pre-consolidación (RSC), u Over Consolidation ratio (OCR)- (Rodríguez Serquén, 2016)	64
Figura 2.27: Corrección de la curva por método de Schmertmann- (Rodríguez Serquén, 2016)	66
Figura 3.1: Ubicación de C.E. de Moya (toma Google Earth)	69
Figura 3.2: Instrumentos para límite líquido	70
Figura 3.3: Determinación de gravedad específica	70
Figura 3.4: Equipo para ensayo de consolidación	71
Figura 3.5: Cámara de consolidación	72

Figura 3.6:	Extracción de muestra	73
Figura 3.7:	Secado de muestras para determinar el contenido de humedad . . .	74
Figura 3.8:	Ensayo para límite líquido en copa de Casagrande	75
Figura 3.9:	Extracción de muestra para el contenido de humedad	76
Figura 3.10:	Secado en horno de las muestras	76
Figura 3.11:	Pesado de las Muestras Secas	77
Figura 3.12:	Ensayo de límite de contracción	78
Figura 3.13:	Volumen de Mercurio desplazado por la muestra	79
Figura 3.14:	Llenado del picnómetro con muestra	79
Figura 3.15:	Liberación de aire de la muestra	80
Figura 3.16:	Pesado de muestras lavada y retenidas por malla # 200	81
Figura 3.17:	Granulometría por sedimentación	81
Figura 3.18:	Preparado de la muestra inalterada	82
Figura 3.19:	Muestra contenido en el anillo	83
Figura 3.20:	Ensayo de consolidación	84
Figura 3.21:	Ensayo de consolidación para cada ciclo de carga	85
Figura 3.22:	Asentamiento de la muestra después del ciclo de cargas	85
Figura 3.23:	Pesado de la muestra al terminar el ensayo	86
Figura 3.24:	Gráfico para el método de Casagrande	88
Figura 3.25:	Hoja de cálculo en Excel para determinar C_v	89
Figura 3.26:	Determinación del esfuerzo de pre-consolidación de la gráfica $e - \log \sigma'$ en Hoja de Cálculo Excel.	90
Figura 3.27:	Ventana para ingresar datos en Matlab R2016a	93
Figura 3.28:	Resultado que arroja en Matlab R2016a	93
Figura 3.29:	Resultado con diferencias finitas-método implícito en Matlab R2016a	94

Figura 3.30: Resultado con diferencias finitas-método Crank-Nicholsón en Matlab R2016a	95
Figura 3.31: Gráfico 3D de las isócronas de consolidación en Matlab R2016a en escala aritmética.	95
Figura 3.32: Diagrama de flujo para método analítico.	96
Figura 3.33: Diagrama de flujo para método implícito.	97
Figura 3.34: Diagrama de flujo para método Crank-Nicholson.	98
Figura 4.1: Geología del Centro Poblado de Moya	100
Figura 4.2: Muestra inalterada in situ de la arcilla de Moya	101
Figura 4.3: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 1714 min, método analítico Matlab R2016a.	108
Figura 4.4: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 1854 min, método implícito Matlab R2016a.	109
Figura 4.5: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 100 min, método Crank Nicholsón R2016a.	109
Figura 4.6: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 1000 min, método Crank Nicholsón R2016a.	110
Figura 4.7: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 1850 min, método Crank Nicholsón R2016a.	110
Figura 4.8: Isocronas de consolidación en Matlab R2016a para esfuerzo efectivo de 0.59 kg/cm ² y H= 210 cm.	115
Figura 4.9: Curva de consolidación en escala semi- logarítmica.	116
Figura 4.10: Curva de consolidación en escala aritmética.	117
Figura 4.11: Curva de consolidación en 3D en Matlab R2016a en escala lineal	118
Figura A.1: Granulometría de Arcilla de Moya	128
Figura A.2: Granulometría de Arcilla de Moya	129

Figura A.3: Granulometría de Arcilla de Moya	130
Figura A.4: Granulometría de Arcilla de Moya	131
Figura A.5: Resultado de límite líquido y plástico de Arcilla de Moya	132
Figura A.6: Resultado de límite líquido y plástico de Arcilla de Moya	133
Figura A.7: Resultado de límite líquido y plástico de Arcilla de Moya	134
Figura A.8: Resultado de límite líquido y plástico de Arcilla de Moya	135
Figura A.9: Resultado de clasificación de Arcilla de Moya	136
Figura A.10: Resultado de clasificación de Arcilla de Moya	137
Figura A.11: Resultado de clasificación de Arcilla de Moya	138
Figura A.12: Resultado de clasificación de Arcilla de Moya	139
Figura A.13: Gravedad específica de la Arcilla de Moya.	140
Figura A.14: Registro de datos del consolidómetro ensayo 02.	141
Figura A.15: Gráfica de los datos por logaritmo de tiempo ensayo 02.	142
Figura A.16: Resultado de coeficiente de consolidación vertical (Cv) ensayo 02 .	143
Figura A.17: Resultado de coeficiente de consolidación vertical (Cv) ensayo 02 .	144
Figura A.18: Determinación de esfuerzos de Pre-consolidación ensayo 02	145
Figura A.19: Registro de datos del consolidómetro del de ensayo 01	146
Figura A.20: Gráfica de los datos por logaritmo de tiempo ensayo 02.	147
Figura A.21: Resultado de coeficiente de consolidación vertical (Cv) ensayo 01 .	148
Figura A.22: Resultado de coeficiente de consolidación vertical (Cv) ensayo 01 .	149
Figura A.23: Resultado de índice de compresión y expansión, Relación de vacíos inicial, de pre consolidación y final por método de Schmertmann para el ensayo 01	150
Figura A.24: Gráficos de logaritmo de esfuerzos efectivos vs relación de vacíos por método de Schmertmann para el ensayo 01	151
Figura B.1: Algoritmo en Matlab R2016a, método analítico	153

Figura B.2: Algoritmo en Matlab R2016a, método implícito	154
Figura B.3: Algoritmo en Matlab R2016a, método Crank Nicholson	155
Figura C.1: Curva teórica de consolidación	156
Figura D.1: Plano de Ubicación	158
Figura D.2: Plano Geológico	159

Tabla de símbolos

1D = Consolidación unidimensional

LL = Limite líquido

LP = Limite plástico

IP = Índice de plasticidad

A = Actividad de las arcillas

RNE = Reglamento Nacional de Edificaciones

G_s = Gravedad específica

W_s (gr) = Peso seco del suelo

V_{agua} (cm³) = Volumen del agua en un recipiente calibrado

ω = Cantidad de humedad del suelo

γ_ω = Peso específico húmedo

W_ω = Peso húmedo del suelo

V_m = Volumen de la masa

γ = Peso específico

t = Tiempo

T_v = Factor tiempo

q = Carga aplicada en una superficie

σ'_v = esfuerzo efectivo vertical

u = presión intersticial

Δh = Variación de altura de presión

h_e = Exceso de cabeza de presión

h_h = Cabeza hidrostática

h_p = altura total de presión

v_z = Velocidad de flujo que entra

$u_z + \Delta_z$ = Velocidad de flujo que sale

S = Área

e = Relación de vacíos

z = Profundidad

u_e = Exceso de presión intersticial

g = Gravedad

a_v = Coeficiente de compresibilidad

m_v = Coeficiente de compresibilidad volumétrica

σ_v = Esfuerzo vertical total

σ'_v = Esfuerzo vertical efectivo

k_v = Permeabilidad vertical

EDP = Ecuaciones Diferenciales Parciales

C_v = Coeficiente de consolidación vertical

$\frac{z}{H}$ = Factor altura

T_v = Factor tiempo

U = Grado de consolidación

σ'_0 = Esfuerzo efectivo inicial

σ'_p = Esfuerzo de pre consolidación

Cc = Indice de compresión

Cs = Indice de expansión

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

A lo largo del tiempo los seres humanos se proyectaron edificar monumentos donde puedan dejar su huella. Toda edificación tiene base sobre un suelo, si no se tiene cuidado en la selección del suelo de fundación, mucho peor si no se da tratamiento y estudio adecuado del mismo, sería catastrófico los efectos en el tiempo. Un claro ejemplo relacionado es la Torre de Pisa (Italia), que ha sufrido los efectos de asentamiento en el tiempo y su posterior consolidación por haberse realizado cimentaciones en un suelo arcilloso.

Según INGEMMET, la zona de estudio, Centro Educativo de Moya pertenece a la formación geológica Ayacucho superior Nm-ay_s, lo que indica que el suelo está formado por limos y arenas con presencia de diatomitas.

1.2. Planteamiento del problema

En el terreno del C. E. de Moya, Distrito de Quinua, Provincia de Huamanga, Región Ayacucho, al realizar los sondeos en dicho terreno se han encontrado arcillas de alta

plasticidad, estas podrían sufrir grandes deformaciones si son sometidas a cargas externas, generando así un proceso de consolidación, con asentamientos diferenciados que causarían grietas y fallas estructurales si se proyecta construir una estructura en la zona.

1.2.1. Problema Principal

¿Qué determina las isócronas de consolidación en función factor tiempo y profundidad en el análisis de un suelo arcillo por los efectos de los esfuerzos efectivos sobre el suelo de fundación del Centro Educativo de Moya?

1.2.2. Problema específico

- ¿Qué características geotécnicas presentara como suelo de fundación la arcilla del Centro Educativo de Moya?
- ¿Qué parámetros de consolidación presenta como suelo de fundación la arcilla del Centro Educativo de Moya?
- ¿Cómo serán las deformaciones volumétricas a lo largo del tiempo de consolidación para la arcilla del Centro Educativo de Moya?
- ¿Cómo se transmiten los esfuerzos efectivos al estrato de arcilla del Centro Educativo de Moya?
- ¿Cómo varían las deformaciones volumétricas de la arcilla durante la consolidación en diferentes tiempos al aplicar las diferentes cargas en el suelo del Centro Educativo de Moya?

1.3. Justificación e importancia

Para realizar un análisis completo del comportamiento del suelo de fundación del C.E. de Moya sería necesario periodos largos de evaluación; pero todo proyecto requiere resultados rápidos y en corto plazos, garantizando la estabilidad de la misma. Por ello es necesario realizar estudios de consolidación unidimensional (1D) para determinar los asientos y deformabilidad del suelo de fundación.

Es importante conocer en qué tipo de suelos se está realizando la cimentación de una edificación, especialmente si el suelo de fundación es conformado de arcillas y hay presencia de nivel freático. Las edificaciones emiten cargas sobre la estructura del suelo, generando deformaciones en ellas, cuando las formaciones son pequeñas y uniformes no son dañinas para la estructura de una edificación, el problema para la estructura de una edificación se genera cuando el suelo de fundación sufre grandes deformaciones a consecuencia de las cargas transmitidas por los edificaciones y la presencia de nivel freático en el área donde se monta la estructura.

Es importante el estudio de consolidación por que la edificación proyectada albergara a muchos niños en etapa escolar y no se puede permitir fallas estructurales que puedan poner en riesgo la integridad de los escolares y público en general.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos generales

Determinar las isócronas de consolidación en el análisis de un suelo arcillo por los efectos de los esfuerzos efectivos sobre el suelo de fundación de la infraestructura proyectada sobre el estrato de arcilla durante el proceso de consolidación en el Centro Educativo de Moya.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar las características geotécnicas de la arcilla del Centro Educativo de Moya.
- Determinar los parámetros de consolidación de la muestra de arcilla del Centro Educativo de Moya.
- Determinar las deformaciones volumétricas a lo largo del tiempo de consolidación para la arcilla del Centro Educativo de Moya.
- Evaluar la transferencia de los esfuerzos efectivos al estrato de arcilla durante el proceso de consolidación para el suelo del Centro Educativo de Moya.
- Evaluar la variación del grado de consolidación durante el proceso de consolidación en el suelo del Centro Educativo de Moya.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis generales

Con las isócronas de consolidación determinada se analiza los efectos de los esfuerzos efectivos sobre el suelo de fundación de la infraestructura proyectada sobre el estrato de arcilla durante el proceso de consolidación en el Centro Educativo de Moya.

1.5.2. Hipótesis específicos

- Con la muestra se determina las caracterizaciones geotécnicas como suelo de fundación en arcilla del Centro Educativo de Moya.

- Determinar los parámetros de consolidación de la muestra de arcilla del Centro Educativo de Moya.
- Con la muestra se determina los parámetros de consolidación como suelo de fundación en arcilla del Centro Educativo de Moya.
- Se determina las deformaciones volumétricas durante el proceso de consolidación para la arcilla del Centro Educativo de Moya.
- Se evalúa la transferencia de los esfuerzos efectivos al estrato de arcilla durante el proceso de consolidación para el suelo del Centro Educativo de Moya.

1.6. Organización del estudio

La presente tesis se ha organizado de tal manera que siga la secuencia de campo, laboratorio, procesamiento y resultados. Para iniciar con el estudio se ha realizado sondeos y extracciones de muestra inalteradas selladas para evitar la alteración de sus propiedades mecánicas y dejen de ser representativas.

La secuencia seguida es la siguiente:

- En el **Capítulo 1**: Se expone como surge el interés de realizar la presente tesis. La sustentación del problema de investigación. La justificación y la importancia de estudio. Asimismo se hace un planteamiento final de los objetivos que persigue la tesis.
- En el **Capítulo 2**: Presenta los conceptos fundamentales para determinar las Isócronas de consolidación, definiendo sobre la estructura y clasificación de arcillas, la caracterización geotécnica, la teoría de consolidación, los parámetros de la consolidación y las isócronas de consolidación.

- El **Capítulo 3**: Presenta la descripción de los equipos necesarios para la caracterización geotécnica y ensayo de consolidación. Así también se detalla la metodología seguida para la determinar la caracterización geotécnica, los parámetros de consolidación e Isócronas de consolidación.
- El **Capítulo 4**: Se tomó en cuenta el geológico de la zona en estudio. Aborda también de los resultados y discusiones de la caracterización geotécnica, los parámetros de consolidación e Isócronas de consolidación.
- El **Capítulo 5**: Se ocupa de las conclusiones con respecto a las investigaciones y resultados obtenidos.
- En el **Capítulo 6**: Se ocupa de las recomendaciones que se debe seguir de los resultados obtenidos en la presente investigación
- **Bibliografía**: Presenta una lista detallada del material bibliográfico utilizado.
- En el **Apéndice A**: Se adjunta los diferentes resultados de clasificación y parámetros de consolidación realizados en hoja de cálculo Excel.

En el **Apéndice B**: Se adjunta el código en Matlab R2016a, de la sub-rutina “*Analitico.m*”, “*Implicito.m*” y “*Crank-Nicholson.m*” que utiliza el algoritmo de Diferencias Finitas para resolver la ecuación de velocidad de consolidación unidimensional.

En el **Apéndice C**: Se adjunta los planos de ubicación y geológico

Capítulo 2

Estado del arte para las isócronas de consolidación

En la ingeniería civil los suelos arcillosos sufren problemas durante y después de la fundación de la estructuras sobre ellas, generándose asentamientos superiores a los permisibles y así afectando la estabilidad y arquitectura de las estructuras edificadas sobre suelos arcillosos. Para toda edificación fundado sobre un suelo arcilloso se requiere del estudio de las propiedades químicas, físicas y mecánicas del suelo arcilloso, para así predecir y tomar medidas de seguridad frente a los asentamientos totales y diferenciales que presentara la estructura.

Es importante identificar la estructura interna de las arcillas ya que depende de ello el comportamiento intermolecular frente al agua, la arcilla en condiciones saturadas aumenta de volumen y disminuye su resistencia a diferentes cargas aplicadas sobre ellas. Pasa lo contrario cuando pierde agua se reduce su volumen y mejora su resistencia al consolidarse.

El fenómeno de la consolidación generalmente se da en suelos finos cohesivos, el proceso consisten en la disminución del volumen frente a las cargas actuantes sobre sobre el estrato del suelo arcilloso durante un tiempo. El primero en realizar los estudios de consolidación

fue *Karl Terzaghi*, así desarrolló la teoría de consolidación unidimensional, mediante prototipos que en la actualidad han sido mejorados con instrumentos de medición de mejor precisión y control. La finalidad de la teoría de consolidación es determinar los parámetros que expresen la deformabilidad y cambio volumétrico de los suelos finos cohesivos.

2.1. Naturaleza de los suelos arcillosos

2.1.1. Origen de las arcillas

Las arcillas los podemos encontrar en la naturaleza originados por la descomposición química de las rocas en forma de sedimentos o depósitos de minerales naturales que se han depositado en los lechos de lagos y mares por la acción de arrastre de los ríos.

Hay autores que afirman que:

Las arcillas son agregados de partículas microscópicas y sub-microscópicas derivados de la descomposición química que sufren los constituyentes de las rocas. Son suelos plásticos dentro de límites extensos en contenido de humedad y cuando están secos son duros, sin que sea posible despegar polvo de una pasta frotando con los dedos. Tienen, además, una permeabilidad extremadamente baja (Terzaghi, 1973).

Según De Pablo Galán (1964), el origen de las arcillas está en la naturaleza y proceso de alteración de los minerales que componen la roca a una temperatura menor de 450 °C y presiones elevadas, los minerales alterados formaran su estructura y composición química de arcilla. A su vez indica que las rocas en condiciones acidas dan origen a arcillas del tipo caolinitas y en condiciones básicas a montmorillonita o talco.

2.1.2. Estructura de las arcillas

Los átomos que constituyen la estructura de las arcillas son la unión de átomos de aluminosilicato más átomos de oxígeno y/o hidrógeno que están dispuestos en forma de láminas. La estructura atómica fue elaborada por primera vez por *Linus Pauling*.

Sposito (2008) define las estructuras de las arcillas de la siguiente manera:

Las láminas silíceas, resulta de la unión de un átomo de silicio en el centro y cuatro átomos de oxígeno formando un tetraedro como se muestra en la figura 2.1a, y que se agrupan en unidades hexagonales cuando se agrupan como se muestra en la figura 2.1b. Los tetraedros son pirámides de base triangular, con lados iguales (cuatro triángulos equiláteros). El tetraedro Si-O se encuentra eléctricamente descompensada (el silicio es un catión tetravalente frente a ocho de los cuatro oxígenos aniones divalentes), por lo cual al unirse con otro catión que puede ser silicio para neutralizar las cargas y así agruparse en unidades hexagonales que se repiten indefinidamente constituyendo láminas.

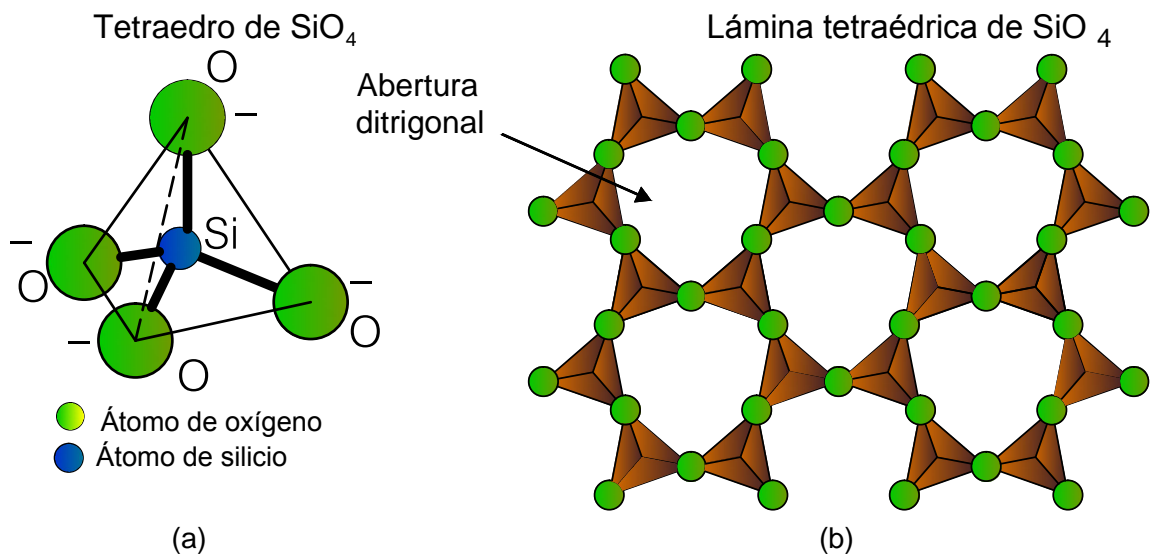


Figura 2.1: Estructura molecular de láminas silíceas (Sposito, 2008)

Las láminas aluminicas, resultan de la unión de un átomo de aluminio y seis átomos de oxígeno formando un octaedro como se muestra en la figura 2.2a, y se agrupan en redes

hexagonales como se muestra en la figura 2.2b. Los octaedros son bipirámides con su plano ecuatorial cuadrada y todas sus caras triangulares equiláteras. Estos octaedros se encuentra también descompensados eléctricamente (dos cargas positivas si el catión es Mg o 3 si es Al, frente a 12 posibles cargas negativas que aportan los seis oxígenos), al unirse se neutralizan y comparten entre si sus vértices formando láminas de Mg y Al distribuidos en redes hexagonales.

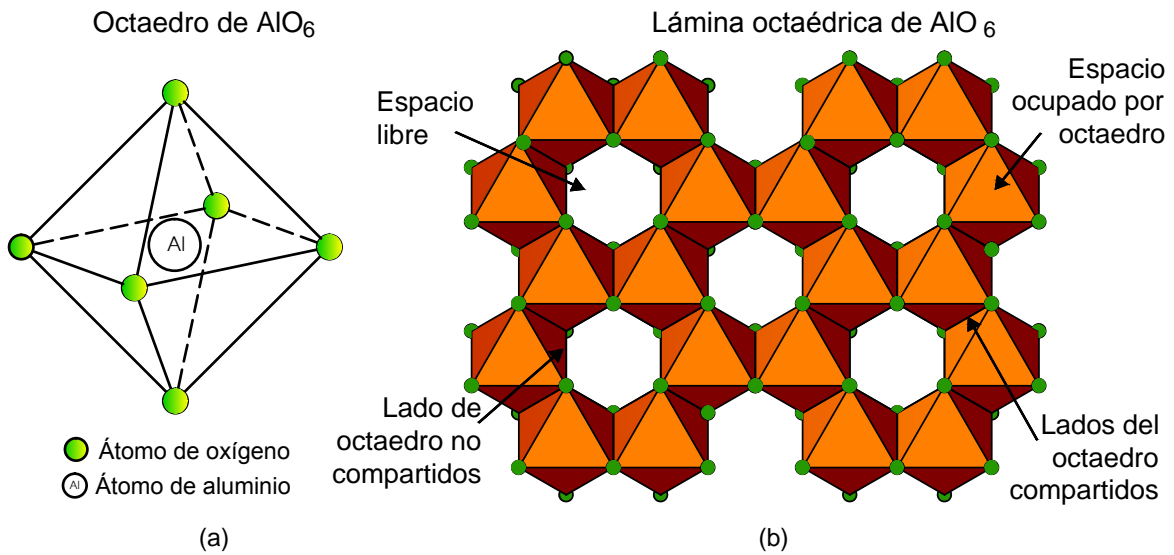


Figura 2.2: Estructura molecular de láminas aluminicas (Sposito, 2008)

Los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: 1:1 una tetraédrica más octaédrica y se denomina bilaminares y se muestra en la figura 2.3a, 2:1 una octaédrica y dos tetraédricas denominados trilaminares se muestra la estructura en la figura 2.3b. hay algunos filosilicatos que las láminas no son neutras a consecuencia de la sustitución de unos cationes, para lo cual es necesario unas interlaminares para encontrar el equilibrio o neutralidad 2:1:1, los cationes más comunes son alcalinos (Na y K) y alcalinotérreos (Mg y Ca).

De lo anterior se deduce que los filosilicatos pueden ser considerados como un empaquetamiento de iones O que engloban a diversos cationes (Si, Al, Mg y H), concepto que pueden ser aplicados a toda la tierra en su conjunto. En resumen, la estructura se origina

Cuadro 2.1: Grupo mineral de las arcillas (Sposito, 2008)

Group	Layer type	Layer charge (x)	Typical chemical formula ^b
Kaolinite	1:1	< 0.01	$[\text{Si}_4]\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n = 0$ or 4)
Illite	2:1	1.2–1.7	$\text{M}_x[\text{Si}_{6.8}\text{Al}_{1.2}]\text{Al}_3\text{Fe}_{0.25}\text{Mg}_{0.75}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
Vermiculite	2:1	1.2–1.8	$\text{M}_x[\text{Si}_7\text{Al}]\text{Al}_3\text{Fe}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
Smectite ^c	2:1	0.4–1.2	$\text{M}_x[\text{Si}_8]\text{Al}_{3.2}\text{Fe}_{0.2}\text{Mg}_{0.6}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
Chlorite	2:1 with hydroxide interlayer	Variable	$(\text{Al}(\text{OH})_{2.55})_4 [\text{Si}_{6.8}\text{Al}_{1.2}]\text{Al}_{3.4}\text{Mg}_{0.6}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

por un apilamiento de planos paralelos con simetrías hexagonales, alternando los planos de aniones (O, OH) y los cationes (Si, Al y Mg).

Según De Pablo Galán (1964)), la arcilla es una asociación de minerales arcillosos (silicatos complejos hidratados de aluminio), de pequeño tamaño de partícula originada por la alteración hidrotermal de rocas ígneas (granitos, riolitas, dioritas, basaltos) que, bajo condiciones propias de presión, temperatura, acidez, etc., desilicifican a minerales arcillosos sílice libre y alcalies que se lixivian según la conocida reacción:

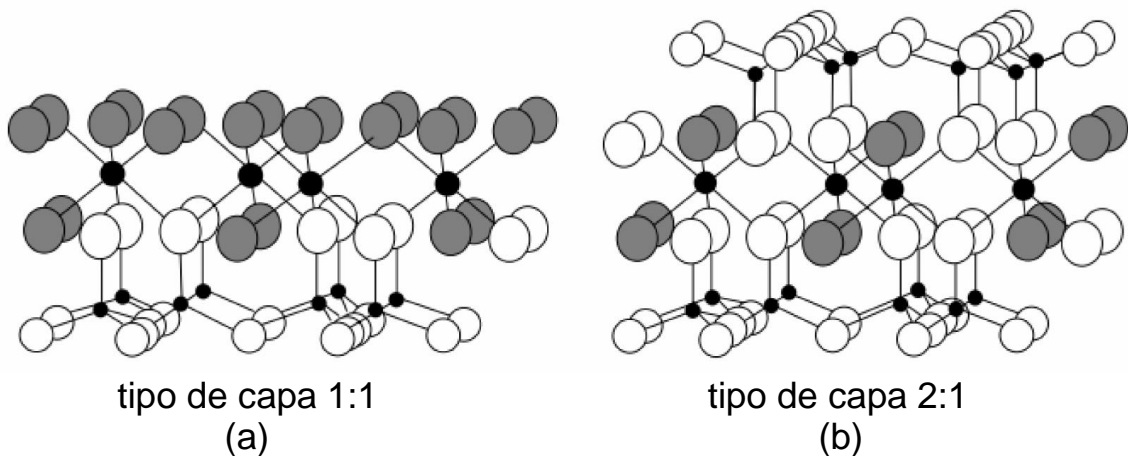
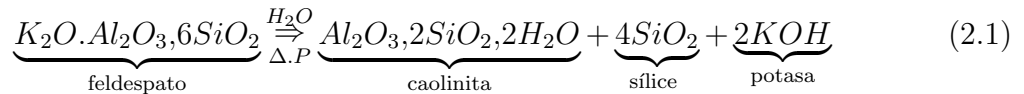


Figura 2.3: Estructura molecular de los filosilicatos (Sposito, 2008)



De las definiciones anteriores se puede concluir que las arcillas son originadas por los intercambios de electrones (gana y pierde para neutralizarse) que sucede dentro de la estructura molecular y por las propiedades moleculares que tienen los elementos que componen una Arcila. Su estructura molecular de las arcillas está compuesto mayor mente por elementos como aluminio, silicato, potasio, oxígeno e hidrógeno y de acuerdo al porcentaje que contenga la arcilla de cada elemento será sus propiedades físicas y químicas.

2.1.3. Clasificación de las arcillas

Según De Pablo Galán (1964), hace referencia que la clasificación de las arcillas desde el punto de vista geológico son dos, primarias o residuales son arcillas que permanecieron en la misma formación y secundarias que fueron acareadas a lugares diferentes de su origen.

La clasificación de las arcillas según la geología, admite los siguientes:

Arcillas Caolinitas (Estables). Su fórmula química es $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$, son productos de la meteorización del feldespato y otros silicatos de aluminio proveniente de granito y normalmente se encuentra en suelos sedimentadas, se presenta en hojuela hexagonales en bilaminares(1:1), de la superposición indefinida de láminas alumínicas y silíceas, la unión entre partículas es muy fuerte de tal modo que no permite la penetración de moléculas de agua.

Arcillas Illitas (colapsables). La fórmula química es $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$, la Illita es un producto de la alteración o meteorización de la

moscovita y el feldespato en ambiente de meteorización hídrica y térmica. Es común en sedimentos, suelos, rocas arcillosas sedimentarias, y en roca metamórfica. Se forman por la superposición indefinida de una lámina alumínica entre dos silíceas (2:1), en su constitución interna manifiesta tendencia a formar grupos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen por ello su expansividad es menos que la de las montmorillonitas y en general, las arcillas illíticas, se comportan mecánicamente en forma más favorable para el ingeniero.

Arcillas Montmorillonitas(expansivas). La estructura es similar al del Illitas, están formadas por una lámina alumínica y dos silíceas(2:1), en este tipo de arcilla la unión entre las retículas es débil, por lo que las moléculas de agua se introduce con facilidad en su estructura, es aquella arcilla susceptible de producir grandes cambios de volumen, en un aumento de humedad del suelo y se contraen al secarse, formando profundas grietas.

La clasificación de las arcillas según De Pablo Galán (1964), de los minerales arcillosos se basan en los tres criterios fundamentales que los define:

1. El espesor de la unidad estructural.
2. Su composición química y contenido iónico.
3. Su orden y simetría, que son consecuencias de su origen y de los procesos de metamorfismo posteriores a los que han estado sometido.

Por todo lo mencionado las arcillas tienen comportamiento plástico en estado acuoso y en algunos casos se hinchan. La existencia de carga en las láminas se puede compensarse y neutralizarse, la poca unión entre moléculas y con el aumento de la hidratación puede permitir el intercambio de cationes fácilmente, la arcilla puede adsorber cationes de la fase líquida, intercambiándolos por una cantidad equivalente de otros cationes, a esta propiedad se le conoce como capacidad de intercambio catiónico.

2.2. Caracterización geotécnica de suelo arcilloso

Consiste en la determinación de las propiedades y composición física, mecánica e hídrica de suelos finos y a su vez permitirá clasificar.

2.2.1. Límites de Atterberg

Son ensayos de laboratorio normalizados que permite determinar la caracterización de los suelos finos y realizados por Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, SUCS). Fue desarrollado a principios de 1900 por un científico sueco agrónomo *Atterberg*, trabajando en la industria de la cerámica. Más tarde, *K. Terzaghi* (a finales de 1920) y *A. Casagrande* (principios de 1930) fue modificado para fines de mecánica de suelos, en donde propone un método de caracterización en suelos compuestos de grano fino. *Atterberg* clasificó el suelo en estado sólido, semisólido, plástico y líquido, entre la frontera de cada estados del suelo se define los tres principales límites de consistencia (líquido, plástico y contracción) y se les denomina límites de Atterberg.

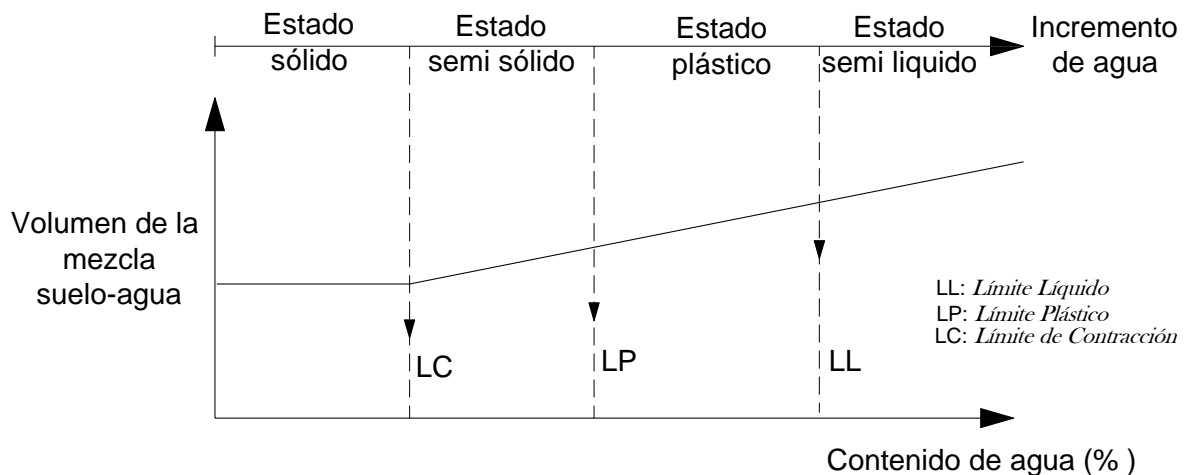


Figura 2.4: Definición de los límites de Atterberg (Das, 2013)

Límite líquido (LL). Es el contenido de humedad, en porcentaje del peso del suelo seco para el cual dos secciones de una pasta de suelo, con las dimensiones indicadas en la fig. 2.5, alcanzan apenas a tocarse sin unirse cuando la taza que las contiene es sometida al impacto de un número fijo de golpes verticales secos. Como la ecuación personal tiene una influencia importante en los resultados del ensayo, se utiliza para ejecutarlo un aparato mecánico normalizado (A. Casagrande, 1932)(Terzaghi, 1973).

El límite líquido de un suelo se determina utilizando la copa de Casagrande de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 339.129, donde indica que, para determinar el contenido de humedad en la muestra, está se cierra en una ranura de 13 mm de longitud mediante 25 golpes.

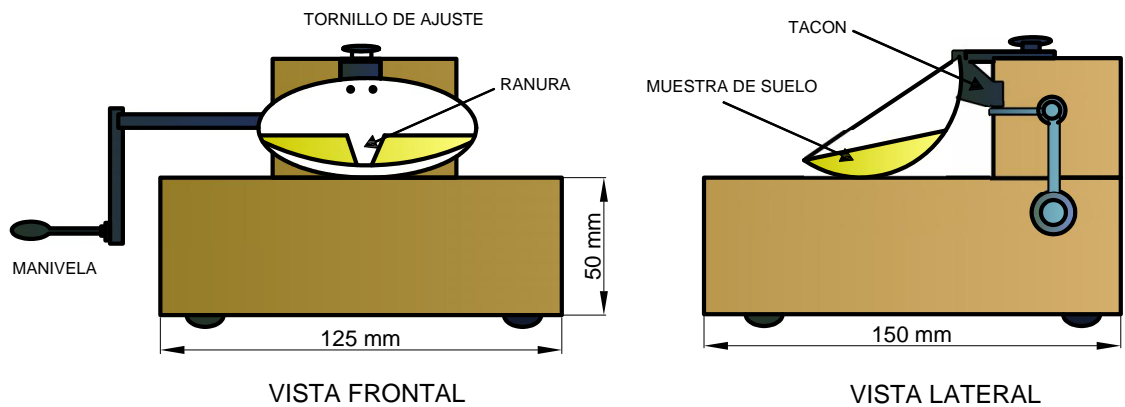


Figura 2.5: Copa de Casagrande-(Elaboración propia)

Límite plástico (LP). También denominado límite inferior del estado plástico, es el contenido de humedad para el cual el suelo comienza a fracturarse cuando es amasado en pequeños cilindros, haciendo rodar la masa de suelo entre la mano y una superficie lisa (Terzaghi, 1973).

El límite plástico de un suelo se determina en una superficie lisa de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 339.129, donde indica que, para determinar el contenido de humedad más bajo al formar un rollito de 3.20 mm sin que se desmorone.

Límite de contracción (LC). También denominado límite inferior de cambio de volumen, es el contenido de humedad por debajo del cual una pérdida de humedad por evaporación no trae aparejada una reducción de volumen. Cuando el contenido de humedad pasa por debajo del límite de contracción el suelo cambia de color, tornándose más claro (Terzaghi, 1973).

El límite de contracción se define como contenido mínimo de agua en el que el suelo no causará una disminución, la Norma Técnica Peruana para determinar el límite de contracción es la NTP 339.140.

Las dos primeras son las más importantes y más utilizadas en la clasificación y caracterización geotécnica. Para determinar los Límites de Atterberg se realiza los ensayos con muestras que pasa la malla # 40 .

En la cuadro 2.2, se muestran valores característicos de los límites de Atterberg para algunos minerales de arcilla comúnmente encontrados en los suelos finos.

Cuadro 2.2: Valores de los límites de Atterberg para los minerales de arcilla (Mitchell, 2005)

Mineral	Límite Líquido (%)	Límite plástico (%)	Límite de Contracción (%)
Montmorilonita	100-900	50-100	8.5-15
Nontronita	37-72	19-27	
Illita	60-120	35-60	25-29
Caolinita	30-110	25-40	
Halosita hidratada	50-70	47-60	
Halosita no Hidratada	35-55	30-45	
Atapulgita	160-230	100-120	
Clorita	44-47	36-40	
Alofano	200-250	130-140	

Actividad

Basándose en los límites de Atterberg, Skempton (1953) definió lo que llamó la actividad (A) de los suelos arcillosos ecuación (2.2).

$$A = \frac{IP}{\text{fracción de arcilla}(\% < 2\mu m)} \quad (2.2)$$

Dónde:

IP; es el índice de plasticidad que refleja el intervalo del estado plástico del suelo y resulta de la diferencia matemática entre el LL y LP.

La fracción de arcilla que pasa en porcentaje del tamaño menores a $2\mu m$, se determinara por análisis de granulometría por sedimentación de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 339.128.

Cuadro 2.3: Actividad de las arcillas-(Duque Escobar, 2016)

Arcilla	Actividad (Skempton)	Indice Plástico (%)	LL (%)
Montmorillonita	0.5 a 7.2	>> 50	Tixotrópico
Illita	0.3 a 0.9	33-50	60-90
Caoloinita	0.1 a 0.4	1-40	30-75

La actividad de las arcillas (A) es necesaria para clasificar un suelo arcilloso y mediante ella identificar sus propiedades y poder realizar la clasificación de la arcilla y a que grupo pertenece según se indica en la Cuadro 2.3. La mayoría de las arcillas son tixotrópicas¹ en mayor o menor grado de acuerdo a su límite líquido.

¹*Tixotrópicas*: Es una propiedad específicamente de algunos fluidos, y consiste en que estos pierden su resistencia, o disminuyen su viscosidad al someterlos a una fuerza cortante a medida que pasa el tiempo.

La Norma Técnica E-050 Suelos y Cimentaciones del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), exige realizar la evaluación del **potencial de expansión** del suelo cohesivo en función del porcentaje de partículas menores a $2\mu m$, del índice de plasticidad (IP) y de la actividad (A) de la arcilla, la clasificación de suelos expansivos se realiza de acuerdo al cuadro 2.4.

Cuadro 2.4: Clasificación de suelos expansivos (RNE E.050)

Potencial de expansión	Expansión en consolidómetro, bajo presión vertical de 7 kPa (0,07 kgf/cm ²)	Índice de plasticidad	Porcentaje de partículas menores que dos micras
%	%	%	%
Muy alto	> 30	> 32	> 37
Alto	20 – 30	23 – 45	18 – 37
Medio	10 – 20	12 – 34	12 – 27
Bajo	< 10	< 20	< 17

2.2.2. Gravedad específica de los sólidos (Gs)

La gravedad específica permite determinar la relación de vacíos de un suelo con respecto al agua y ocasionalmente se puede utilizar en la clasificación. La gravedad específica se define como la relación del peso unitario del material frente al peso unitario del agua.

$$G_s = \frac{W_s}{V_{agua}} \text{ en } (gr/cm^3) \quad (2.3)$$

Dónde:

W_s = Peso seco del suelo (gr).

$V_s = V_{agua}$, en un recipiente calibrado (cm³).

También se puede utilizar la relación del principio de Arquímedes, consistente en que un cuerpo sumergido dentro de una masa de agua desplaza un volumen de agua igual al del

Cuadro 2.5: Gravedad específica de los minerales de la arcilla (Das, 2013)

Mineral	Gravedad específica (G_s) (gr/cm ³)
Cuarzo	2.65
Caolinita	2.6
Ilita	2.8
Montmorillonita	2.65-2.80
Haloisita	2.00-2.55
Feldespato de potasio	2.57
Feldespato de sodio y calcio	2.62-2.76
Clorita	2.60-2.90
Biotita	2.80-3.20
Muscovita	2.76-3.10
Hornblenda	3.00-3.47
Limonita	3.60-4.00
Olivino	3.27-3.37

cuerpo sumergido. El volumen de un peso conocido de partículas de suelo puede obtenerse utilizando un recipiente de volumen conocido.

El error proviene de la inadecuada aireación de la mezcla de agua-suelo, ya que el agua y suelo en condiciones normales tiene aire disuelto, si este aire no se remueve bien hará que disminuya el peso específico del material y otro de los errores la des-calibración de las balanzas (Bowles, 1981).

Para determinar la gravedad específica de los sólidos es de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 339.131, donde describe el procedimiento para determinar la gravedad específica de las partículas sólidas de un material que pasa el tamiz de 4.75 mm (N°4), por medio de un picnómetro. La norma también describe dos procedimientos para determinar la gravedad específica, con muestra seca o húmeda.

2.2.3. Contenido de humedad del suelo (ω)

La determinación del contenido de humedad en un ensayo rutinario de laboratorio para establecer la cantidad de agua que contiene el suelo en el estado natural en relación a su peso en seco. Tiene la finalidad de determinar el cambio de volumen cohesión y estabilidad mecánica, especialmente en suelos finos.

$$\omega = \frac{W_{\omega}}{W_s} \text{ en } (\%) \quad (2.4)$$

Donde:

W_{ω} = peso del agua (gr).

W_s = peso de la muestra seca (gr).

Para determinar adecuadamente el contenido de humedad es necesario cantidades mínimas de acuerdo a su granulometría como se muestra en tabla 2.5 .

En algunos casos no es recomendable el secado del suelo a una temperatura de 110°C, ya que puede alterar sus características como el caso de los suelos orgánicos (turbas), en el mineral que contiene el suelo, algunas arcillas y suelos tropicales, ya que las moléculas de agua están adheridas a la estructura del suelo. Para ello es recomendable secar a una temperatura de 60°C (Bowles, 1981).

Cuadro 2.6: Tamaños adecuados para determinar la humedad natural (Bowles, 1981)

Tamaño máx. de las partículas	Peso mínimo recomendado (gr.)
N° 4 (4.75 mm)	100
N° 40 (0.420 mm)	10 a 50
12.5 mm	800
50.0 mm	1000

Según la Norma Técnica Peruana NTP 339.127, indica el método de ensayo permite determinar en laboratorio el contenido de agua (humedad) con respecto a la masa de los suelos, rocas, y materiales similares, donde la reducción en masa por secado, se debe a la pérdida de agua.

2.2.4. Peso específico (γ_w)

Este procedimiento permite obtener el volumen desplazado de cualquier suelo cohesivo que no se destruya por estar dentro del agua de 1 a 2 min requeridos para hacer el ensayo. No es aplicable para material poroso o a suelos muy seco, a menos que se encuentre en alto estado de densidad ya que una absorción apreciable por capilaridad o por cualquier otra forma puede afectar los resultados (Bowles, 1981).

Para determinar el peso específico se sigue los procedimientos de ensayo de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 339.139 para suelos cohesivos inalterados.

$$\gamma_w = \frac{W_m}{V_m} \text{ en } (gr/cm^3) \quad (2.5)$$

Dónde:

W_m : peso de la masa (gr).

V_m : volumen de la masa (cm³)

Las muestras inalteradas se pueden impermeabilizar con parafina para evitar que la muestra absorba agua y se puede determinar por la siguiente relación.

$$\gamma_w = \frac{W_m}{\Delta V - V_{parafina}} \text{ en } (gr/cm^3) \quad (2.6)$$

Dónde:

ΔV : Volumen del suelo más parafina (cm³).

$V_{parafina}$: Volumen de la parafina (cm³).

2.2.5. Clasificación de los suelos de grano fino

Según Whitlow (1976), lo que influye más en la clasificación de suelos finos es la forma de las partículas y no el tamaño del suelo, al sufrir un aumento de contenido de humedad, produce un material inestable y disminuyendo la resistencia a esfuerzos cortantes, allí es donde se usa la consistencia plástica del suelo fino para identificar si es arcilla. La relación entre **índice de plasticidad** (IP, intervalo del estado plástico resultado de la diferencia de límite líquido con límite plástico) y el límite líquido se utiliza para clasificar los suelos de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 339.134 y mediante la carta de plasticidad como muestra en la figura 2.6. De acuerdo a la carta de plasticidad figura 2.6, se determina

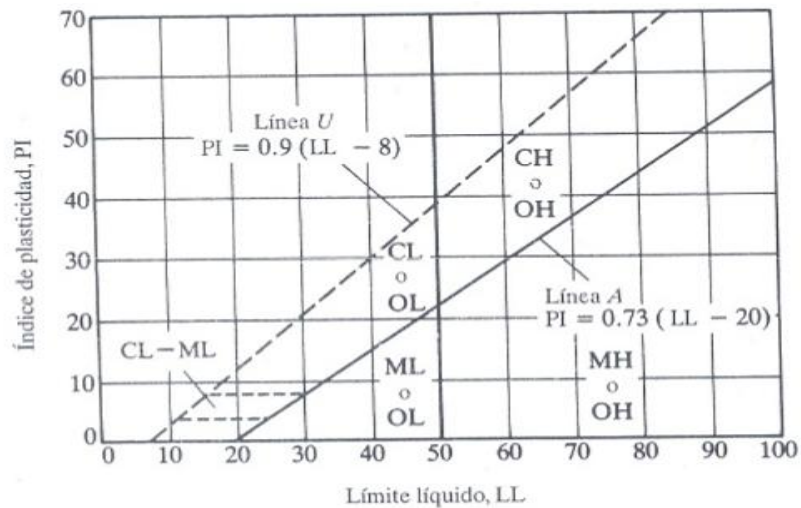


Figura 2.6: Carta de plasticidad (Norma NTP, 339.134)

los siguientes grupos.

Dónde:

LL: límite líquido (%)

IP: índice de plasticidad (%)

ML: Limos inorgánicos de baja compresibilidad.

OL: Limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad.

CL: Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH: Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH: Limos orgánicos de alta compresibilidad.

OH: Arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.

Grupos **CL** y **CH**. El grupo **CL** comprende a la zona sobre la línea A de la carta de plasticidad, definida por LL menor 50 % e IP mayor 7 %.

El grupo **CH** corresponde a la zona arriba de la línea A, definida por LL mayor 50 %.

Grupos **ML** y **MH**. El grupo **ML** comprende la zona abajo de la línea A, definida por LL menor 50 % y la porción sobre la línea A con IP menor 4 %. El grupo **MH** corresponde a la zona abajo de la línea A, definida por LL mayor 50 %.

En estos grupos quedan comprendidos los limos típicos inorgánicos y limos arcillosos, los tipos comunes de limos inorgánicos y limos arcillosos. Los tipos comunes de limos inorgánicos y polvo de roca, con LL menor 30 %, se localizan en el grupo **ML**. Los depósitos eólicos, del tipo loess, con 25 % menor LL y menor 35 % usualmente, caen también en este grupo.

Los suelos finos que caen sobre la línea A y con 4 % menor IP y menor 7 % se consideran como casos de frontera, asignándoles el símbolo doble **CL-ML**.

Grupos **OL** y **OH**. Las zonas correspondientes a estos dos grupos son los mismos que la de los grupos **ML** y **MH**, respectivamente, si bien los orgánicos están siempre en lugares próximos a la línea A.

2.3. Consolidación en suelos finos

El proceso de consolidación se da en suelos finos cohesivos en estado saturado, poroso y compresible, cuando se somete a una serie de cargas los poros expulsan agua hacia los exteriores y las partículas del suelo sufren deformaciones a consecuencia de las cargas en un tiempo largo. La razón por la cual requiere mucho tiempo los suelos cohesivos para llegar a la consolidación es a su baja permeabilidad. Así la estructura del suelo adquiere mayor resistencia a esfuerzos cortantes. El proceso de consolidación solo se da en suelos finos cohesivos (arcillas y limos de alta plasticidad).

La consolidación es resultado de la disipación gradual del exceso de la presión de poro del agua en un estrato de arcilla, que a su vez incrementa el esfuerzo efectivo que induce los asentamientos. Además, para estimar el grado de consolidación de un estrato de arcilla en un tiempo (t) después de la aplicación de la carga, se requiere conocer la rapidez de la disipación del exceso de presión de poro del agua (Das, 2001).

Según Terzaghi (1973), la consolidación de una capa de arcilla se inicia en la superficie de drenaje y prosigue de la misma hacia el interior. Por ello, en los primeros momentos de la consolidación, los niveles piezómetros de la parte central de la capa se hallan aún en el estado inicial, mientras que hacia los bordes han disminuido. En el proceso de consolidación se da los siguientes efectos importantes en la estructura del suelo:

- Eliminación de agua de los poros existentes en la estructura del suelo.
- Hay asentamientos pronunciados a consecuencia de la reducción del volumen de poros.
- El esfuerzo efectivo aumenta a consecuencia de la disipación del exceso de presión intersticial.

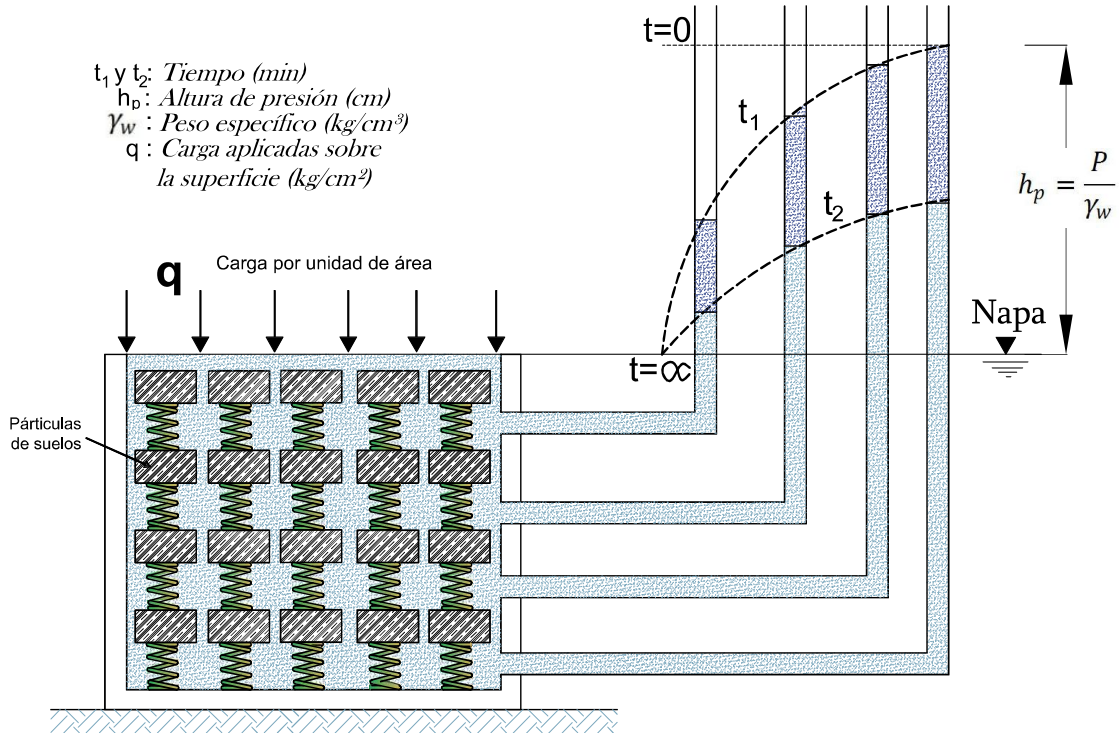


Figura 2.7: Dispositivo para demostrar en forma mecánica como se produce la consolidación Terzaghi (1973)

2.3.1. Teoría de Terzaghi para consolidación unidimensional (1D).

La consolidación fue estudiada por el ingeniero *Karl Terzaghi*, la teoría de consolidación unidimensional propone realizar diferentes pruebas y controles en especímenes representativas de la estructura del suelo y determinar los parámetros propios del suelo en estudio y con dichos datos poder predecir el asentamiento total de la estructura y la velocidad a la cual se produce dicho asentamiento.

Según Ing. *Karl Terzaghi*, menciona que al iniciar el fenómeno de consolidación, existe en la arcilla una sobre presión hidrostática es casi igual a la tensión de consolidación. Con el correr del tiempo el sobre presión del agua disminuye, con lo cual aumenta la presión efectiva. Después de mucho tiempo el sobre presión hidrostática se hace igual a cero y la

presión de consolidación se transforma en presión efectiva transmitida de grano a grano.

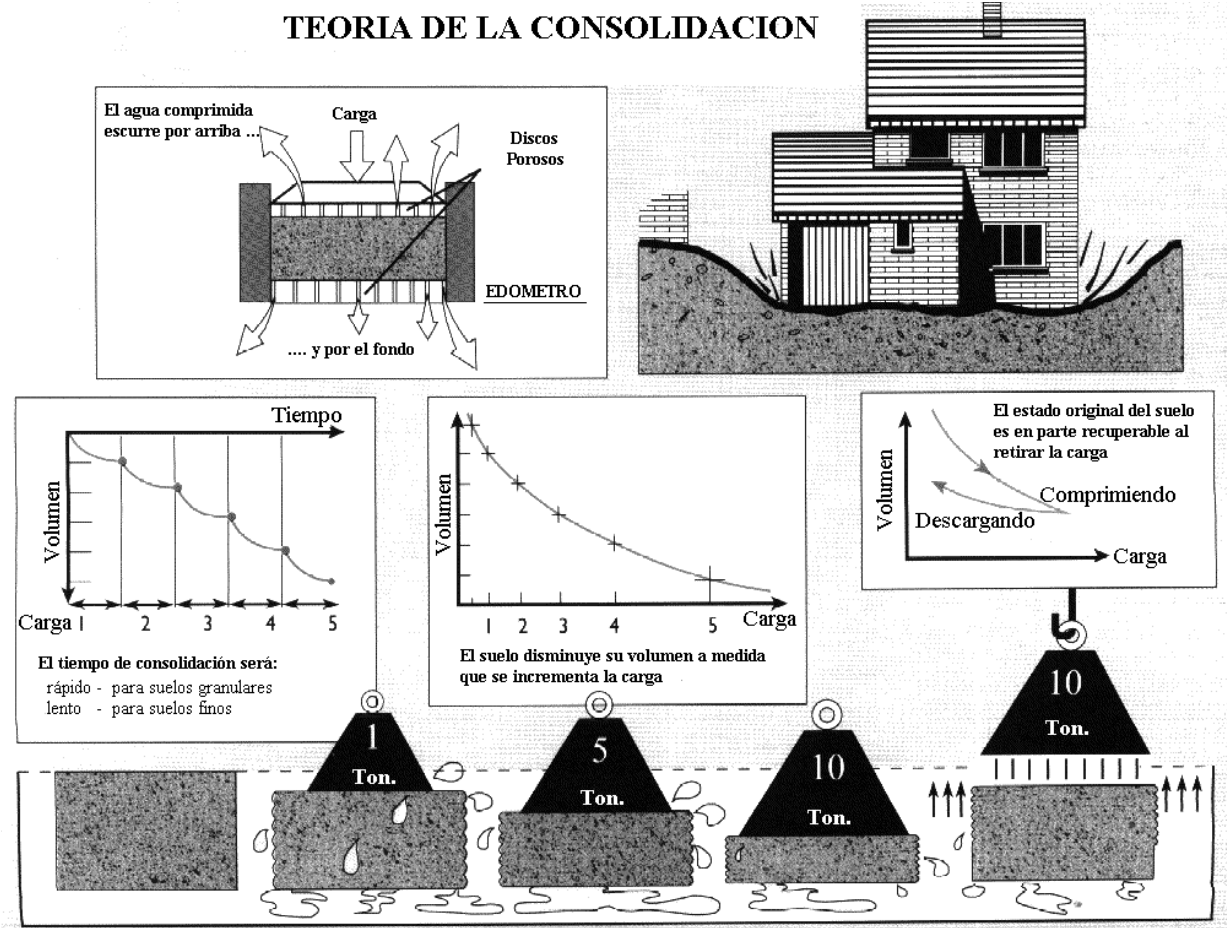


Figura 2.8: Dispositivo para demostrar en forma mecánica como se produce la consolidación (ELE Internacional Ltda., 1993)

Para explicar la teoría de consolidación se han realizado la analogía con el modelo idealizado de un sistema compuesto por un resorte, un cilindro con un agujero y relleno de agua, modelo propuesto por *Terzaghi* (Análogica hidromecánica para ilustrar la distribución de cargas en la consolidación).

- o En la figura 2.9(1) muestra el estado 1, donde el sistema se encuentra en equilibrio ya que no hay cargas externas que puedan cambiar del sistema en equilibrio.
- o En la figura 2.9(2) muestra el segundo estado, donde se aplica una carga constante sin permitir el drenaje del agua que existe en los poros, en esta etapa el sistema al

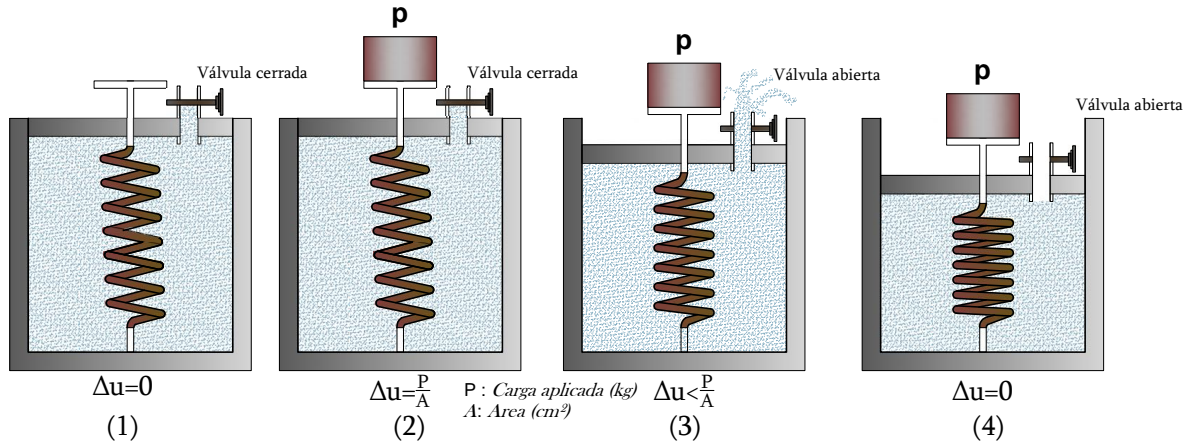


Figura 2.9: Estados del suelo en un proceso de consolidación-(Das, 2013)

ser sometida a cargas externas, el agua absorbe las presiones ejerciendo una presión contraria a la carga externa aplicada al sistema, así generándose sobrepresiones en los poros del suelo.

- o En la figura 2.9(3) muestra el tercer estado, que al permitir el drenaje del agua en sistema se genera una disipación del exceso de presión de poros, así dando una disminución del volumen del sistema y adquiriendo mayor resistencia el suelo, a su vez disminuye el exceso de presión de poros y vacíos en función al tiempo a la cual se mantiene la carga externa al sistema. Esta etapa se le conoce como el proceso de consolidación.
- o En la figura 2.9(4) muestra el cuarto estado, que después de un tiempo termina el drenaje del agua y se disipa la presión de excesos de poros y vacíos. En esta etapa la resistencia del suelo es por si sola y con ello termina la consolidación.

La teoría de consolidación unidimensional (1D) de Terzaghi se basó en las siguientes hipótesis:

- Suelo está totalmente saturado y es homogéneo.
- La Ley de Darcy aplica para el flujo de agua.

- La variación de volumen es unidimensional en la dirección del esfuerzo aplicado.
- El coeficiente de permeabilidad en esta dirección permanece constante.

Según Das (2001), hace mención que:

En campo, cuando el esfuerzo sobre una capa de arcilla saturada se incrementa, por ejemplo, por la construcción de una cimentación, la presión de poro del agua se incrementará. Debido a que la permeabilidad hidráulica de las arcillas es muy pequeña, se requerirá algún tiempo para que el exceso de presión de poro del agua se disipe y el incremento del esfuerzo se transfiera gradualmente a la estructura del suelo.

2.4. **Isócronas de consolidación unidimensional (1D)**

Es la curva que da el lugar geométrico de los niveles de agua en los piezómetros en un instante. Refleja el proceso de consolidación, ya que muestra la rapidez con que drena en las fronteras de acuerdo a la permeabilidad y va disminuyendo hacia el centro. Además muestra como la consolidación avanza en el tiempo a medida que aumenta el esfuerzo resistente de la arcilla.

La isócronas representan todas las curvas de la variación de las sobrepresiones hidrostáticas en el transcurso del tiempo, inicialmente la sobrepresión hidrostática que actúa en la sección vertical cualquiera de la capa de arcilla viene representada por una recta horizontal, situada a una distancia $\frac{\Delta p}{\gamma}$ por encima del nivel de agua libre, con el transcurrir del tiempo, los niveles del agua en los tubos siguen decreciendo hasta adoptar una línea horizontal, después de un tiempo largo, la sobrepresión hidrostática se hace muy pequeña y los esfuerzos efectivos aumentan.

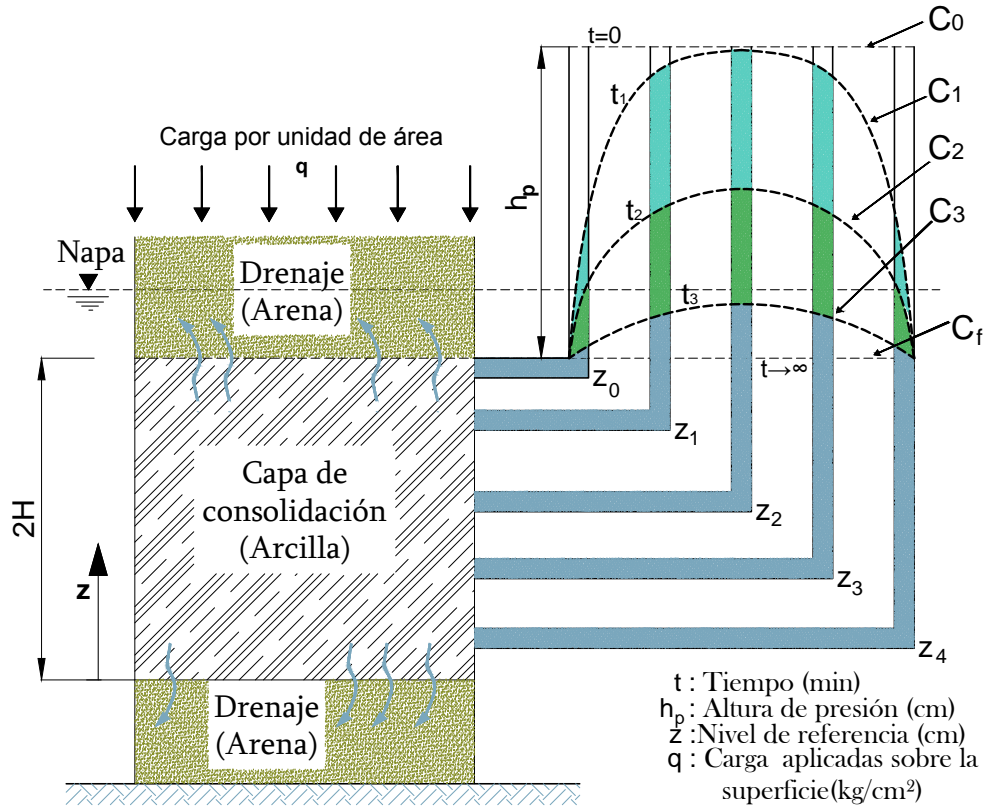


Figura 2.10: Diagrama que ilustra la consolidación de una capa compresible de arcilla (Terzaghi, 1973)

En $t=0$, la isócrona es horizontal y de altura igual a la presión, que es absorbida por el agua como sobrepresión hidrostática. En los primeros instantes los bordes se consolidan rápidamente puesto que el agua se disipa fácilmente al estar en zonas próximas a las cargas drenantes.

Para tiempo infinito se supone isócronas horizontales ya que se ha disipado toda la presión hidrostática.

Según la teoría de *Terzaghi* en las fronteras llegarán rápidamente a la consolidación e ira transmitiéndose la energía de la consolidación hacia el interior en el transcurso del tiempo. También nos dice la velocidad de consolidación en el centro es lenta, prácticamente aproximado a cero.

Considera ahora un estrato de arcilla de espesor $2H$ como lo mostrado en la figura 2.10,

drenado por ambas caras y en él una curva de distribución de presiones efectivas y neutrales correspondiente a un tiempo t , al cual, a su vez, corresponde un valor específico de factor T . La forma de la curva, según se deduce de las condiciones de frontera establecidas, es del mostrado en la figura 2.11 (Eulalio, 2005).

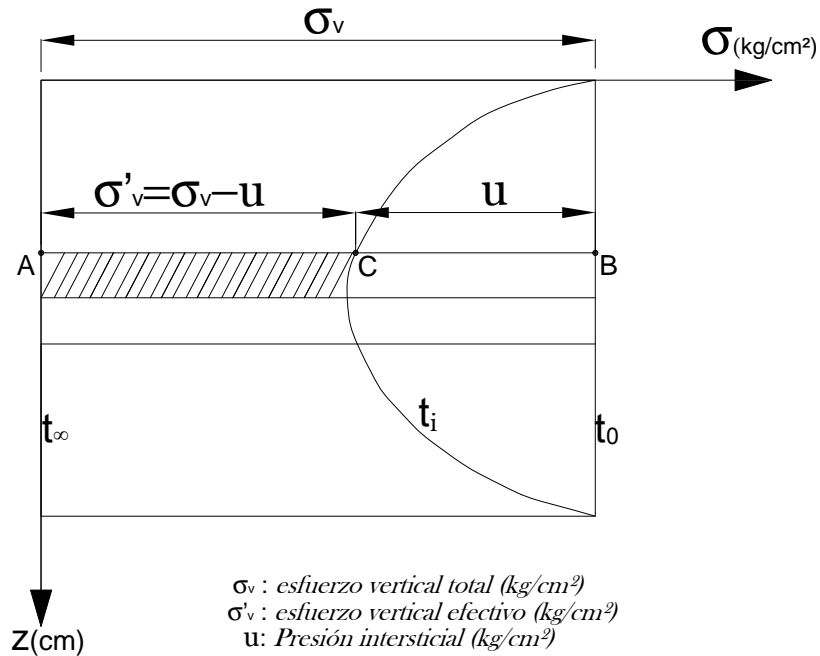


Figura 2.11: Depósito de suelo drenado por ambas caras y distribución de presiones efectivas y neutral (Eulalio, 2005)

2.4.1. Deducción de la ecuación de la velocidad de consolidación unidimensional (1D)

Berry (1993), la deducción de la ecuación de la velocidad de consolidación unidimensional considerando un depósito de suelo homogéneo, saturado, de longitud lateral infinita y sometido a una carga uniforme q (kg/cm²), aplicada en toda el área superficial (Figura 2.12). El suelo reposa sobre una base impermeable y drena libremente por su cara superior. La disipación del exceso de presión intersticial en cualquier punto solo se producirá mediante

el flujo del agua intersticial en sentido vertical ascendente hacia la superficie, ya que el gradiente hidráulico únicamente se presenta en la dirección vertical.

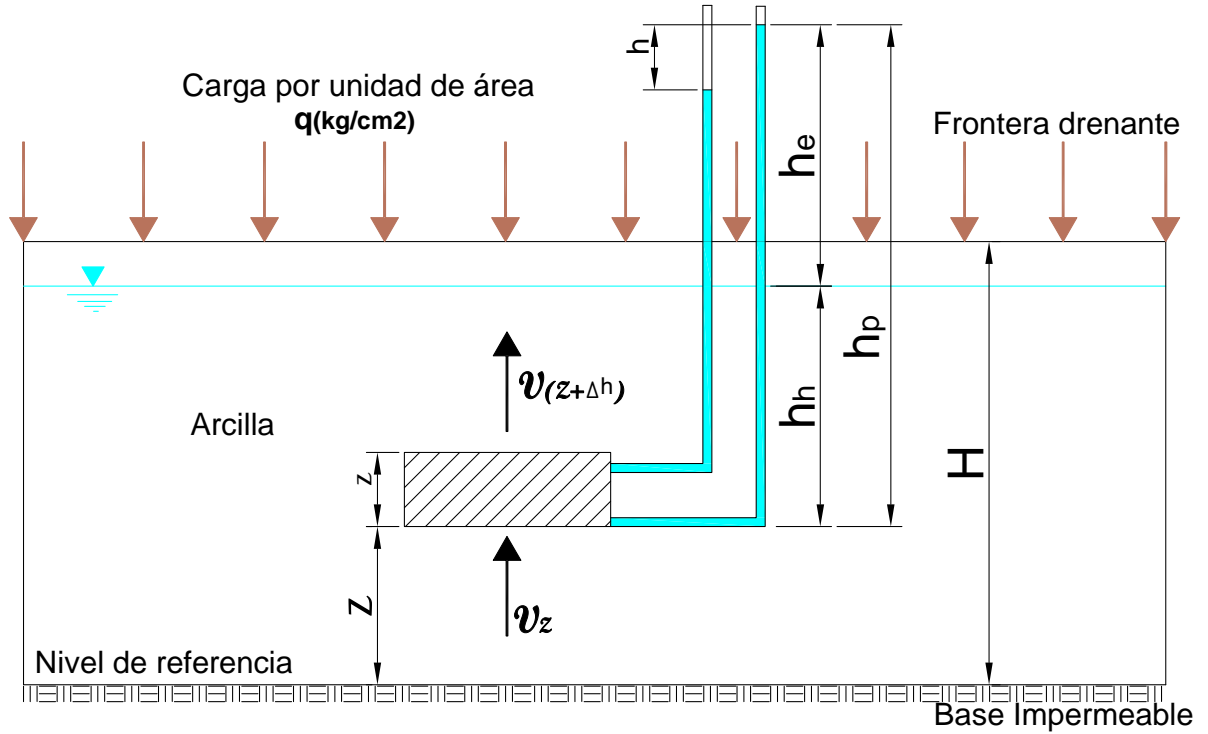


Figura 2.12: Consolidación vertical de una capa de suelo (Berry, 1993)

Por tanto, para un elemento de suelo se tiene:

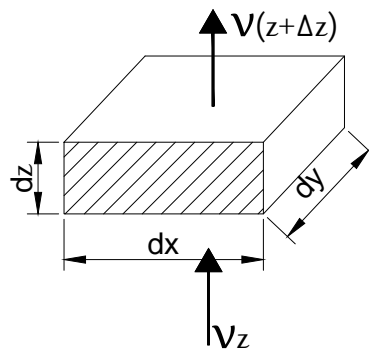


Figura 2.13: Diferencial de una partícula de suelo (Berry, 1993)

Donde:

v_z Es la velocidad vertical del flujo que entra en el elemento y

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

$v_{z+\Delta z}$ Es la velocidad vertical del flujo que sale del elemento.

Si se aplica el teorema de Taylor, se tiene:

$$v_{z+\Delta z} = v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \Delta z^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 v_z}{\partial z^3} \Delta z^3 + \dots \quad (2.7)$$

Puesto que Δz se toma muy pequeño, puede suponerse que los términos de segundo orden y de orden superior son insignificantes y entonces

$$v_{z+\Delta z} = v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z$$

A partir del principio de continuidad del volumen se tiene que

Cantidad de flujo que sale del elemento por unidad de tiempo	-	Cantidad de flujo que entra en el elemento por unidad de tiempo	=	Velocidad de cambio de volumen del elemento
--	---	---	---	---

Entonces:

$$\left[v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \right] A - v_z A = - \frac{\partial V}{\partial t}$$

Donde A es el área plana del elemento y V es el volumen. Por tanto

$$V \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial V}{\partial t}$$

Si se supone que las partículas de suelo y el agua intersticial son incompresibles, entonces la velocidad de cambio de volumen del elemento $\partial V/\partial t$ es igual a la velocidad de cambio de volumen de vacíos $\partial V_v/\partial t$. Entonces

$$V \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial V_v}{\partial t} \quad (2.8)$$

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

Si V_s Es el volumen de sólidos en el elemento y e es la relación de vacíos, entonces por definición $V_v = eV_s$. Si se reemplaza en la ecuación (2.8) y se tiene en cuenta que V_s es una constante, se obtiene

$$V \frac{\partial v_z}{\partial z} = -V_s \frac{\partial e}{\partial t}$$

De donde:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.9)$$

A partir de la ecuación de Darcy se obtiene para el flujo vertical del agua intersticial a través del elemento

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.10)$$

Donde:

h : La cabeza total en el elemento.

k_z : El coeficiente de permeabilidad vertical del suelo.

k_v : En la terminología de Terzaghi el coeficiente de permeabilidad vertical.

Si se adopta esta notación, de la ecuación (2.9) se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.11)$$

En la práctica, las deformaciones verticales por lo general son pequeñas y por tanto es razonable suponer que la permeabilidad del suelo permanece constante durante la

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

aplicación del incremento de carga. Por tanto se obtiene:

$$k_v \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.12)$$

Si se toma la base del suelo como nivel de referencia, la cabeza total h del elemento está dada por:

$$h = z + h_h + h_e$$

Donde z es la cabeza de posición, h_h es la cabeza hidrostática y h_e el exceso de cabeza de presión. En la teoría de pequeñas deformaciones puede que $z + h_h$ permanece constante. Entonces:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2} \quad (2.13)$$

El exceso de presión intersticial u_e en el elemento está dado por:

$$u_e = \rho_w g h_e$$

De donde se obtiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (2.14)$$

Si se sustituye la ecuación (2.14) en la ecuación (2.12) y se redondea, se obtiene:

$$\frac{k_v(1+e)}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.15)$$

Se tiene entonces una ecuación con dos incógnitas (u_e y e) y para plantear el problema completamente se necesita una ecuación adicional que relacione el exceso de presión de

intersticial y la relación de vacíos. Esta se obtiene al considerar el comportamiento como lineal para un incremento de carga en particular, como muestra la Figura 2.14a. Puesto que el cambio de deformación es proporcional al cambio de relación de vacíos, esto también implica la existencia de una relación lineal $e - \sigma'_v$ (Figura 2.14b), lo cual es completamente razonable siempre que la relación de incremento de presión sea casi igual a la unidad. La pendiente de la línea en la Figura 2.14b se designa con a_v y se denomina *coeficiente de compresibilidad*.

Se tiene entonces:

$$a_v = \frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \quad (2.16)$$

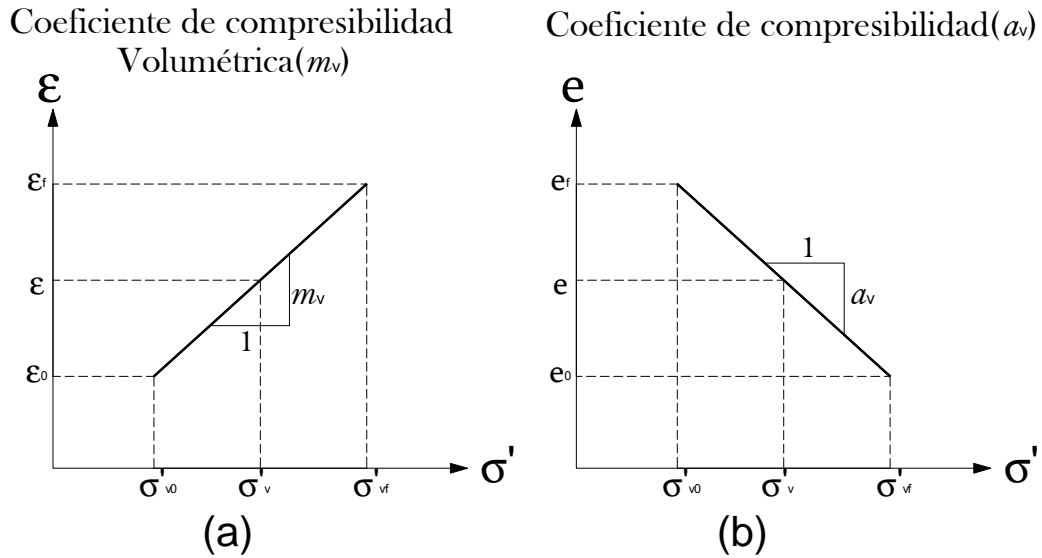


Figura 2.14: Comportamiento de m_v y a_v en función a esfuerzo vs deformación y relación de vacíos respectivamente (Berry, 1993)

Si σ_v es el esfuerzo vertical total sobre el elemento (Figura 2.11), σ'_v el esfuerzo vertical efectivo en el elemento y u la presión intersticial correspondiente, entonces a partir del

principio de esfuerzos efectivos se tiene:

$$\sigma_v = \sigma'_v + u$$

La presión intersticial u está dada por la presión hidrostática y por el exceso de presión u_e . Esto es:

$$u = u_h + u_e$$

Por tanto:

$$\sigma_v = \sigma'_v + u_h + u_e \quad (2.17)$$

Al derivar con respecto al tiempo t

$$\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} + \frac{\partial u_e}{\partial t} = 0$$

De donde se obtiene:

$$\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} = - \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.18)$$

Además:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial u_e}{\partial \sigma'_v} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}$$

Por consiguiente, al sustituir las ecuaciones (2.16) y (2.18):

$$\frac{\partial e}{\partial t} = a_v \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.19)$$

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

Y al sustituir la ecuación (2.19) en la ecuación (2.15) se obtiene:

$$\frac{k_v(1+e)}{\rho_w g a_v} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.20)$$

Esta ecuación se expresa de manera más conveniente así:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.21)$$

La ecuación (2.21) es la que define todo el proceso de consolidación estudiada para una partícula muy pequeña de suelo en el que el drenaje se produce linealmente y determina las curvas isócronas de consolidación.

Donde:

C_v : coeficiente de consolidación en min/cm^2 .

$$C_v = \frac{k_v}{m_v \gamma_v} \quad (2.22)$$

m_v : coeficiente de compresibilidad en cm^2/gr .

$$m_v = \frac{a_v}{(1+e)} \quad (2.23)$$

γ_w : peso específico o volumétrico de la muestra (gr/cm^3)

k : permeabilidad hidráulica de la arcilla (cm/min)

2.4.2. Condiciones iniciales y de frontera para las isócronas de consolidación (1D)

Cuyas condiciones de frontera de acuerdo a la teoría de consolidación unidimensional para una capa semi-abierta es:

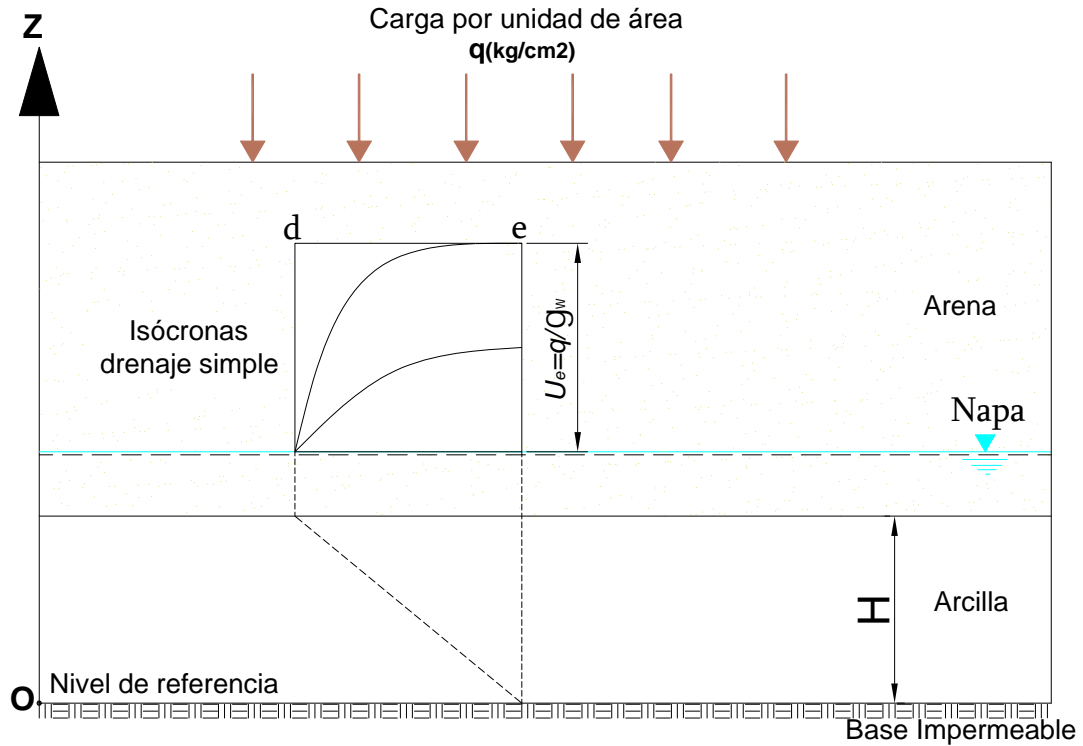


Figura 2.15: Condiciones hidráulicas de borde para una capa semi-abierta (Terzaghi, 1973)

1. Como se tienen estratos de arena altamente permeables en el extremo en $z=H$ e impermeable en el extremo $z=0$, el exceso de presión de poro desarrollada en la arcilla en esos puntos será inmediatamente disipada, por consiguiente:

$$\Delta u = 0 \text{ en } z = H$$

Dónde:

H: Longitud de la trayectoria máxima de drenaje (debido a una condición de drenaje doble, es decir, arriba y debajo de la arcilla).

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

- la velocidad de consolidación está representada por la pendiente de la recta tangente a la curva de consolidación, la pendiente $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ en el instante $z=0$.
- en el tiempo $t=0$ el exceso inicial de presión de poro del agua después de la aplicación de la carga es igual a $\Delta u = \Delta u_0$
- en un tiempo $t = \infty$, la presión de poros del agua es igual a cero en cualquier profundidad del estrato.

$$\Delta u = 0$$

En un estrato donde los extremos son permeables con una carga constante y distribuida en toda la superficie se da las siguientes condiciones de borde.

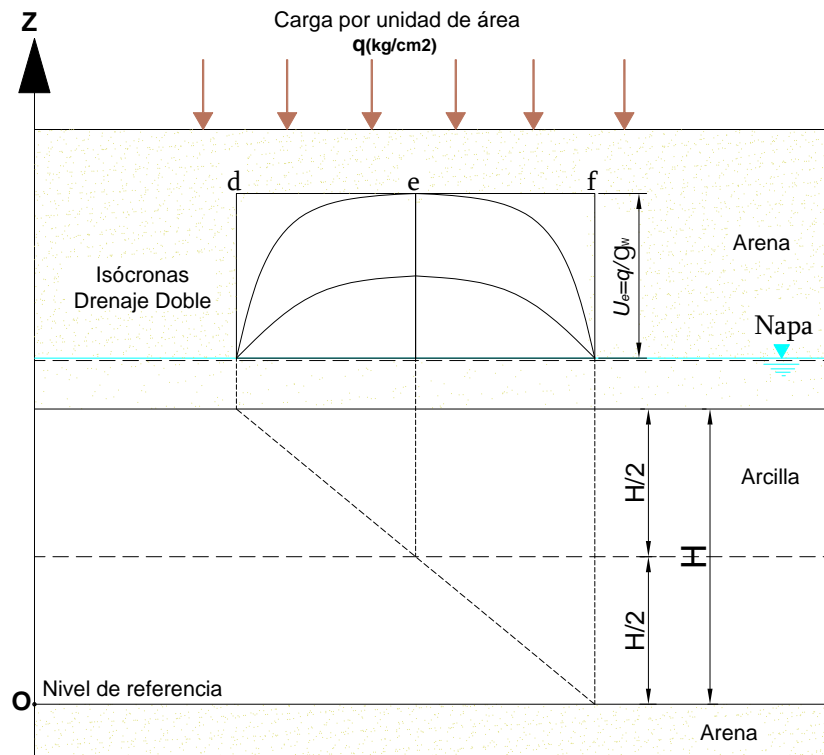


Figura 2.16: Condiciones hidráulicas de borde para una capa abierta en ambos extremos (Terzaghi, 1973)

1. Como se tienen estratos de arena altamente permeables en los extremos en $z=0$ y $z=H$, el exceso de presión de poro desarrollada en la arcilla en esos puntos será inmediatamente disipada. Por consiguiente:

$$\Delta u = 0 \text{ en } z = 0$$

$$\Delta u = 0 \text{ en } z = H$$

Dónde:

H: Longitud de la trayectoria máxima de drenaje (debido a una condición de drenaje doble, es decir, arriba y debajo de la arcilla).

$$\Delta u = 0 \text{ en } z = H$$

2. La velocidad de consolidación es la la pendiente de la recta tangente a la curva de consolidación en el instante de $z=H/2$ es igual a $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$.
3. En el tiempo $t=0$ el exceso inicial de presión de poro del agua después de la aplicación de la carga:

$$\Delta u = \Delta u_0$$

4. en un tiempo $t = \infty$, la presión de poros del agua es igual a cero en cualquier profundidad del estrato.

$$\Delta u = 0$$

2.4.3. Solución de la ecuación de comportamiento.

Método analítico.

La Ecuación Diferencial Parcial (EDP), que define el comportamiento de la consolidación es la ecuación (2.21). Para solucionar se tiene en cuenta las siguientes condiciones iniciales y contorno para un estrato semiabierto.

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

Para un área cargada de extensión ilimitada, la presión aplicada q es constante, con la profundidad e inicialmente es absorbida por el agua intersticial en la forma de un exceso de presión u_{oe} .

Se tiene entonces:

Condición inicial para $t = 0$: $u_e = u_{oe} = q$ para $0 \leq z \leq H$

Condición de frontera para todo t : $\frac{\partial u_e}{\partial z} = 0$ en $z = 0$, $u_e = 0$ en $z = H$

Condición final para $t = \infty$: $u_e = 0$ para $0 \leq z \leq H$

Se resolverá la ecuación diferencial mediante el método de separación de variables y serie de Fourier:

Para realizar la solución de la EDP por el método de separación de variables, se asume que la ecuación de exceso de presión de poros está dada por el producto de la función altura y tiempo cada una separada.

$$u(z, t) = F(z) \cdot G(t) \quad (2.24)$$

Se determina la segunda derivada parcial con respecto a la altura.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = F''(z) \cdot G(t) \quad (2.25)$$

Luego se determina la primera derivada parcial con respecto al tiempo.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(z) \cdot G'(t) \quad (2.26)$$

Luego se reemplaza en la ecuación (2.21) las derivadas parciales independientes obtenidas.

$$F(z) \cdot G'(t) = c_v F''(z) \cdot G(t) \quad (2.27)$$

Despejando resulta:

$$\frac{G'(t)}{c_v \cdot G(t)} = \frac{F''(z)}{F(z)} = \alpha \quad (2.28)$$

La única forma de que esta última expresión sea válida, es considerando que ambos miembros sea iguales a una misma constante de separación “ α ”, la constante puede tomar valores de:

$$\begin{cases} \alpha < 0 \rightarrow \alpha = -\lambda^2 \\ \alpha = 0 \\ \alpha > 0 \rightarrow \alpha = \lambda^2 \end{cases}$$

Caso 1: para $\alpha < 0 \rightarrow \alpha = -\lambda^2$

Remplazando tendríamos dos ecuaciones una de segundo orden y la otra de primer orden.

1. Resolviendo la Ecuación de segundo orden:

$$\frac{F''(z)}{F(z)} = \alpha = -\lambda^2$$

$$F''(z) + \lambda^2 F(z) = 0 \quad (2.29)$$

La Ecuación característica:

$$m^2 + \lambda^2 = 0 \quad (2.30)$$

Y la ecuación solución será:

$$F(z) = c_1 \cos(\lambda z) + c_2 \text{sen}(\lambda z) \quad (2.31)$$

2. Resolviendo la Ecuación de primer orden:

$$\frac{G'(t)}{c_v G(t)} = \alpha = -\lambda^2$$

$$G''(t) + c_v \lambda^2 G(t) = 0 \quad (2.32)$$

La Ecuación característica:

$$m + c_v \lambda^2 = 0 \quad (2.33)$$

Resolviendo la ecuación de segundo orden resulta:

$$m = -c_v \lambda^2$$

y la ecuación solución será :

$$G(t) = c_3 e^{-c_v \lambda^2 t} \quad (2.34)$$

Reemplazando en la ecuación inicial los resultados obtenidos de F(z) y G(t).

$$u(z, t) = F(z) \cdot G(t)$$

$$u(z, t) = (c_1 \cos(\lambda z) + c_2 \operatorname{sen}(\lambda z)) \cdot c_3 e^{-c_v \lambda^2 t}$$

$$u(z, t) = (c_1 \cdot c_3 \cdot \cos(\lambda z) + c_2 \cdot c_3 \cdot \operatorname{sen}(\lambda z)) \cdot e^{-c_v \lambda^2 t} \quad (2.35)$$

La multiplicación de constantes es otro constante por lo cual hacemos que $A = c_1 \cdot c_3$ y

$B = c_2.c_3$, resulta:

$$u(z, t) = (A \cos(\lambda z) + B \operatorname{sen}(\lambda z)) \cdot e^{-c_v \lambda^2 t} \quad (2.36)$$

Para determinar las constantes se tendrá en cuenta las condiciones iniciales y fronteras que se da en la consolidación.

Condición de frontera para todo t : $\frac{\partial u_e}{\partial z} = 0$ en $z = 0$, $u_e = 0$ en $z = H$

Primera derivada de la ecuación con respecto a “z”.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = e^{-c_v \lambda^2 t} (-\lambda \operatorname{Asen}(\lambda z) + \lambda B \cos(\lambda z)) \quad (2.37)$$

Reemplazando en la primera derivada para $z=0$ es $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$

$$e^{-c_v \lambda^2 t} (-\lambda \operatorname{Asen}(\lambda * 0) + \lambda B \cos(\lambda, 0)) = 0$$

$$e^{-c_v \lambda^2 t} (\lambda B) = 0 \quad (2.38)$$

Del análisis se llega al resultado de que $\lambda e^{-c_v \lambda^2 t} \neq 0$ entonces $B=0$. Luego la ecuación resulta:

$$u(z, t) = (A \cos(\lambda z)) e^{-c_v \lambda^2 t} \quad (2.39)$$

Reemplazando para $z=H$ es $u=0$:

$$u(H, t) = (A \cos(\lambda H)) e^{-c_v \lambda^2 t} = 0 \quad (2.40)$$

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

Del análisis resulta que $A.e^{-c_v\lambda^2 t} \neq 0$ entonces $\text{Cos}(\lambda.H) = 0$, el ángulo tiene que ser múltiplo de $\pi/2$, para que el coseno tenga como valor cero entonces resulta que:

$$\lambda.H = \frac{\pi}{2} (2n - 1), \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2H} (2n - 1), \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

Por principio de superposición (para cada valor de “n” se consigue A_n valores diferentes) resultando:

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{\pi}{2H} (2n - 1) z\right) e^{-c_v\left(\frac{\pi}{2H} (2n-1)\right)^2 t} \quad (2.41)$$

Condición inicial para $t = 0$: $u_e = u_{oe} = q$ para $0 \leq z \leq H$, entonces reemplazando en la ecuación resulta:

$$u(z, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{\pi}{2H} (2n - 1) z\right) e^{-c_v\left(\frac{\pi}{2H} (2n-1)\right)^2 * 0}$$

$$u(z, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{\pi}{2H} (2n - 1) z\right) * 1 = 0 \quad (2.42)$$

La última expresión es el desarrollo de una serie de series:

$$A_n = \frac{1}{H} \int_{-H}^H u_0 \cdot \text{Cos}\left(\frac{\pi}{2H} (2n - 1) z\right) dz \quad (2.43)$$

De la solución del integral resulta:

$$A_n = \frac{2(-1)^{(n-1)}}{H \left(\frac{\pi}{2H} (2n - 1)\right)} \cdot u_0 \quad (2.44)$$

La solución de la ecuación (2.21) está dada por

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{(n-1)}}{H \left(\frac{\pi}{2H} (2n-1) \right)} u_0 \cos \left(\frac{\pi}{2H} (2n-1) z \right) e^{-c_v \left(\frac{\pi}{2H} (2n-1) \right)^2 t} \quad (2.45)$$

Donde:

H : Longitud máxima de la trayectoria de drenaje.

$n : 1, 2, 3, \dots, \infty$

La solución de la ecuación (2.21) está dada por la ecuación (2.45), cuyas soluciones dará valores de presión de poros para diferentes valores de z y t . La ecuación (2.45) es el resultado de análisis de un estrato donde un extremo superior es permeable y extremo inferior es impermeable lo cual es considerada drenaje simple y sus isócronas están representadas como en la figura 2.17.

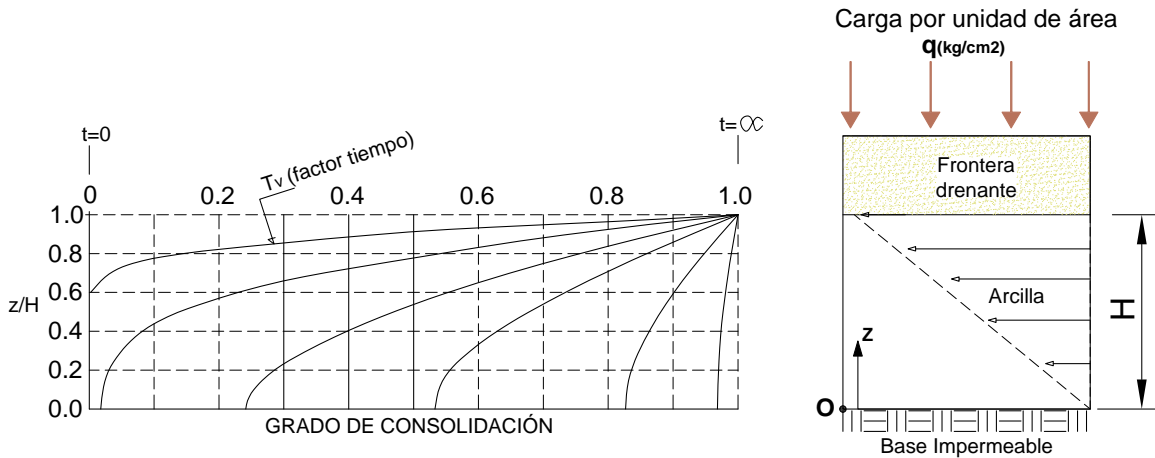


Figura 2.17: Isócronas de consolidación para drenaje simple (Berry, 1993)

Para un estrato de suelo donde los extremos superior e inferior son permeables el drenaje se da en ambos extremos por lo cual se le denomina drenajes doble, la consolidación de la mitad inferior de la capa de suelo es la imagen reflejada de la mitad superior ya que es simétrico y periódico, es una de las propiedades de la función que define la ecuación

(2.45), por consiguiente, el comportamiento durante la consolidación para drenaje doble está representado por la figura 2.18.

La gráfica de las líneas de isócronas de consolidación importantes por que muestran cómo se transmiten los esfuerzos y se lleva el proceso de consolidación. Como se puede apreciar en la figuras 2.17 y 2.18, la consolidación se da rápidamente en los extremos drenantes y es muy lenta en la parte céntrica del estrato de arcilla en caso de doble drenaje y zona impermeable del estrato en caso de simple drenaje.

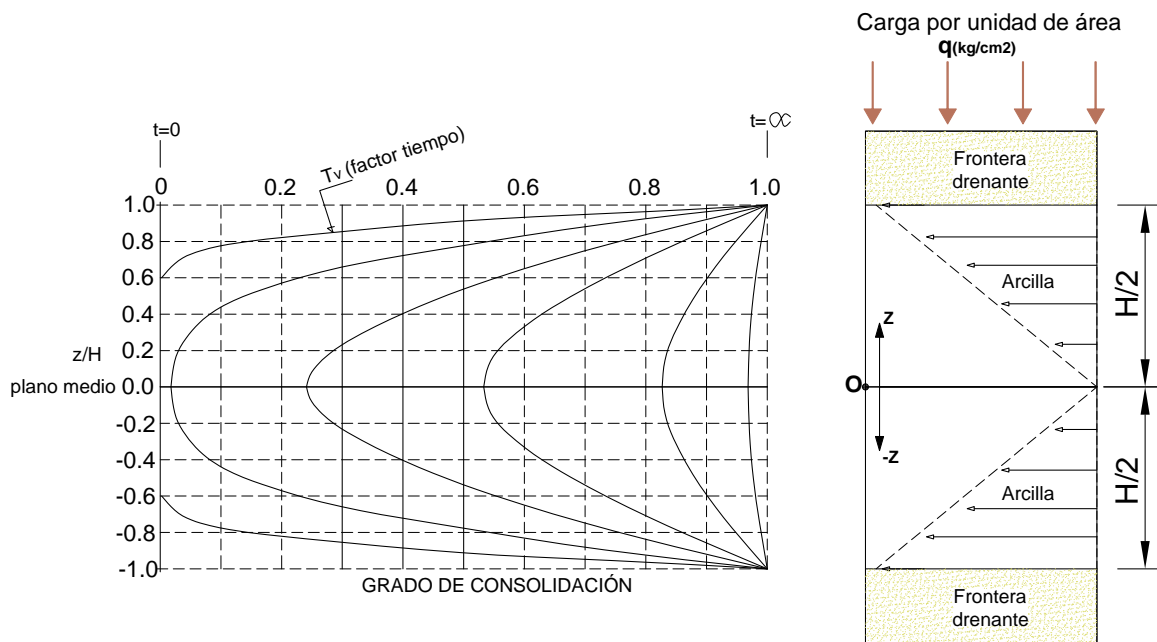


Figura 2.18: Isócronas de consolidación para drenaje Doble (Berry, 1993)

Isócronas de consolidación con diferencias finitas.

La ecuación diferencial que define el comportamiento de las consolidaciones es del EDP de tipo Parabólico ya que varían con el tiempo y el espacio que pueden ser solucionados mediante el método de diferencias finitas.

Chapra (2007), define que para solucionar una ecuación diferencial parabólica sustituyendo las derivadas parciales por diferencias divididas finitas teniendo en cuenta los cambios de tiempo y espacio. Hay dos métodos de solución:

Método explícito.

La ecuación diferencial parcial (EDP) de consolidación se soluciona realizando la aproximación de la segunda derivada en el espacio, y la primera derivada en el tiempo. La segunda derivada se representa, de la misma manera que la Laplace, mediante una diferencia dividida finita cerrada (Chapra, 2007).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{u_{i+1}^l - 2u_i^l + u_{i-1}^l}{(\Delta z)^2} \quad (2.46)$$

Que tiene un error de $O [(\Delta x)^2]$

Y la otra diferencia finita de primer orden sirve para aproximar a la derivada con respecto al tiempo.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_i^{l+1} - u_i^l}{\Delta t} \quad (2.47)$$

Que tiene un error de $O (\Delta t)$

Sustituyendo las ecuaciones (2.46) y (2.47) en la ecuación (2.21) se obtiene:

$$C_v \frac{u_{i+1}^l - 2u_i^l + u_{i-1}^l}{\Delta z^2} = \frac{u_i^{l+1} - u_i^l}{\Delta t} \quad (2.48)$$

Despejando resulta:

$$u_i^{l+1} = u_i^l + \lambda (u_{i+1}^l - 2u_i^l + u_{i-1}^l) \quad (2.49)$$

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

Dónde: $\lambda = \frac{C_v \Delta t}{(\Delta z)^2}$

Teniendo en cuenta las condiciones iniciales y de frontera:

Condición inicial para $t = 0$: $u_e = u_{oe} = q$ para $0 \leq z \leq H$

Condición de frontera para todo t : $\frac{\partial u_e}{\partial z} = 0$ en $z = 0$, $u_e = 0$ en $z = H$

Condición inicial para $t = \infty$: $u_e = 0$ para $0 \leq z \leq H$

Resulta:

Para la condición inicial $t=0$ Para $z=0$ es $i=0$

$$u_0^{l+1} = u_0^l + \lambda (u_1^l - 2u_0^l + u_{-1}^l)$$

$$u_0^{l+1} = u_0^l + \lambda (u_1^l - 2u_0^l + u_{-1}^l) \quad (2.50)$$

Dónde: por la condición de frontera $u_{n+1}^l = u_0 = q_{adm}$

Reemplazando queda:

$$u_0^{l+1} = u_0^l + \lambda (u_1^l - 2u_0^l + q_1)$$

$$u_0^1 = \lambda (q_1) \quad (2.51)$$

Para $z=H$ es $i=n$

$$u_n^{l+1} = u_n^l + \lambda (u_{n+1}^l - 2u_n^l + u_{n-1}^l)$$

Dónde: $u_{n+1}^l = u_0 = q_{adm}$

$$u_{n+1}^1 = \lambda (q_2) \quad (2.52)$$

Para los diferentes intervalos de tiempos será $l = 1, 2, 3, \dots$

Para cada fracción de H es $i = 1, 2, 3, \dots, n - 1$

$$u_i^{l+1} = u_i^l + \lambda (u_{i+1}^l - 2u_i^l + u_{i-1}^l) \quad (2.53)$$

La convergencia y estabilidad se observa cuando $\lambda \leq 1/2$, donde se tiene buenos resultados y una solución donde los errores no crecen, caso contrario $\lambda > 1/2$ oscilan y tienen problemas de estabilidad (Chapra, 2007).

Método implícito.

La derivada se aproxima en un nivel de tiempo posterior $l+1$, donde se aproximara la segunda derivada a una ecuación de segundo orden siguiente (Chapra, 2007).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{u_{i+1}^{l+1} - 2u_i^{l+1} + u_{i-1}^{l+1}}{(\Delta z)^2} \quad (2.54)$$

Las ecuaciones (2.54) y (2.47) se remplaza en la ecuación (2.21) obteniendo:

$$C_v \frac{u_{i+1}^{l+1} - 2u_i^{l+1} + u_{i-1}^{l+1}}{(\Delta z)^2} = \frac{u_i^{l+1} - u_i^l}{\Delta t} \quad (2.55)$$

Reagrupando a un sistema de ecuaciones lineales de la forma:

$$-\lambda u_{i-1}^{l+1} + (1 + 2\lambda) u_i^{l+1} - \lambda u_{i+1}^{l+1} = u_i^l \quad (2.56)$$

De acuerdo a las condiciones de fronteras en los extremos resultan: para $i=0$

$$u_0^{l+1} = q_1 \quad (2.57)$$

Para $i=n+1$

$$u_{n+1}^{l+1} = q_2 \quad (2.58)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.57) y (2.58) en la ecuación (2.56), se obtiene la ecuación de diferencias finitas para el primer nodo interior $i=1$ y último nodo interior (Chapra, 2007):

Para $i=1$

$$(1 + 2\lambda) u_1^{l+1} - \lambda u_2^{l+1} = u_1^l + \lambda u_0^{l+1}$$

$$(1 + 2\lambda) u_1^{l+1} - \lambda u_2^{l+1} = 2(1 - \lambda) u_1^l + \lambda u_2^l + 2\lambda q_1 \quad (2.59)$$

Para $i=n$

$$-\lambda u_{n-1}^{l+1} + (1 + 2\lambda) u_n^{l+1} = \lambda u_{n+1}^l + 2(1 - \lambda) u_n^l + \lambda u_{n-1}^l + \lambda u_{n+1}^{l+1}$$

$$-\lambda u_{n-1}^{l+1} + (1 + 2\lambda) u_n^{l+1} = u_n^l + \lambda q_2 \quad (2.60)$$

Cuando se escriben las ecuaciones (2.56), (2.59) y 2.60), resulta un sistema de ecuaciones lineales de la forma $AX+B=0$. Dónde:

$$A = \begin{bmatrix} 1 + 2\lambda & -\lambda & 0 & \dots & 0 \\ -\lambda & 1 + 2\lambda & & \vdots & \\ 0 & \ddots & 0 & & \\ \vdots & 1 + 2\lambda & -\lambda & & \\ 0 & \dots & 0 & -\lambda & 1 + 2\lambda \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

$$B = \begin{bmatrix} u_1^l + \lambda u_0^{l+1} \\ u_2^l \\ \vdots \\ u_{n-1}^l \\ u_n^l + \lambda u_{n+1}^{l+1} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$X = \begin{bmatrix} u_1^{l+1} \\ u_2^{l+1} \\ \vdots \\ u_{n-1}^{l+1} \\ u_n^{l+1} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones lineales se obtendrán los valores de X, así se hará iterativo hasta lograr que converjan los valores de X.

Método de Crank-Nicholson.

Según Chapra (2007), hace referencia que el método de Crank-Nicholson ofrece un esquema implícito alternativo que tiene una exactitud de segundo orden, tanto para el espacio como para el tiempo. Para alcanzar tal exactitud, se desarrollan aproximaciones para diferencias en el punto medio del incremento del tiempo.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{(u_{i+1}^l - 2u_i^l + u_{i-1}^l)}{(\Delta z)^2} + \frac{(u_{i+1}^{l+1} - 2u_i^{l+1} + u_{i-1}^{l+1})}{(\Delta z)^2} \right] \quad (2.64)$$

La ecuaciones (2.64) y (2.47) se remplaza en la ecuación (2.21) obteniendo:

$$C_v \frac{1}{2} \left[\frac{(u_{i+1}^l - 2u_i^l + u_{i-1}^l)}{(\Delta z)^2} + \frac{(u_{i+1}^{l+1} - 2u_i^{l+1} + u_{i-1}^{l+1})}{(\Delta z)^2} \right] = \frac{u_i^{l+1} - u_i^l}{\Delta t} \quad (2.65)$$

Reagrupando a un sistema de ecuaciones lineales de la forma:

$$-\lambda u_{i-1}^{l+1} + (1 + 2\lambda) u_i^{l+1} - \lambda u_{i+1}^{l+1} = u_{i+1}^l - 2(1 - \lambda) u_i^l + u_{i-1}^l \quad (2.66)$$

De acuerdo a las condiciones de fronteras en los extremos resultan: Para carga constante, ya que en la consolidación se mantiene constante la carga $i=0$

$$u_0^{l+1} = u_0^l = q_1 \quad (2.67)$$

Para carga constante $i=n+1$

$$u_{n+1}^{l+1} = u_{n+1}^l = q_2 \quad (2.68)$$

Al reemplazar las ecuaciones (2.67) y (2.68) en la ecuación (2.66), se obtiene la ecuación de diferencias finitas para el primer nodo interior $i=1$ y último nodo interior $i=n$ (Chapra, 2007):

Para $i=1$

$$2(1 + \lambda) u_1^{l+1} - \lambda u_2^{l+1} = \lambda u_0^l + 2(1 - \lambda) u_1^l + \lambda u_2^l + \lambda u_0^{l+1}$$

$$(1 + 2\lambda) u_1^{l+1} - \lambda u_2^{l+1} = 2(1 - \lambda) u_1^l + \lambda u_2^l + 2\lambda q_1 \quad (2.69)$$

Para $i=n$

$$-\lambda u_{n-1}^{l+1} + (1 + 2\lambda) u_n^{l+1} = \lambda u_{n+1}^l + 2(1 - \lambda) u_n^l + \lambda u_{n-1}^l + \lambda u_{n+1}^{l+1}$$

2.4. Isócronas de consolidación unidimensional (1D)

$$-\lambda u_{n-1}^{l+1} + (1 + 2\lambda) u_n^{l+1} = 2(1 - \lambda) u_n^l + \lambda u_{n-1}^l + 2\lambda q_1 \quad (2.70)$$

Cuando se escriben las ecuaciones (2.66), (2.69) y (2.70), resulta un sistema de ecuaciones lineales de la forma $AX+B=0$.

Dónde:

$$A = \begin{bmatrix} 2(1 + \lambda) & -\lambda & 0 & \dots & 0 \\ -\lambda & 2(1 + \lambda) & & & \vdots \\ 0 & \ddots & 0 & & \\ \vdots & 2(1 + \lambda) & -\lambda & & \\ 0 & \dots & 0 & -\lambda & 2(1 + \lambda) \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

$$B = \begin{bmatrix} 2(1 - \lambda) u_1^l + \lambda u_2^l + 2\lambda q_1 \\ u_3^l - 2(1 - \lambda) u_2^l + u_1^l \\ \vdots \\ u_{n+1}^l - 2(1 - \lambda) u_n^l + u_{n-1}^l \\ 2(1 - \lambda) u_n^l + \lambda u_{n-1}^l + 2\lambda q_1 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

$$X = \begin{bmatrix} u_1^{l+1} \\ u_2^{l+1} \\ \vdots \\ u_{n-1}^{l+1} \\ u_n^{l+1} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones lineales se obtendrán los valores de X, así se

hará iterativo hasta lograr que converjan los valores de X .

Cuando la presión de poros se iguala con la presión efectiva termina la consolidación. La consolidación se lleva cuando hay flujo no movimiento del agua de entre las partículas del suelo.

2.5. Parámetros de consolidación unidimensional

2.5.1. Ensayo de consolidación unidimensional (1D)

Las muestras se colocan dentro de un anillo, con una piedra porosa en la parte superior y otra en la parte inferior de la muestra en la figura 2.19. Luego se aplica una carga a la muestra de manera que el esfuerzo vertical total se transmita uniforme en toda la superficie de la muestra durante 24 horas o más. Se toman periódicamente lecturas de asentamiento de la muestra. Después, la carga sobre la muestra se duplica y se toman más muestras de asentamiento. En todo momento durante la prueba, la muestra se mantiene bajo agua. El procedimiento continúa hasta que alcance el límite deseado del esfuerzo en la muestra de arcilla (Das, 2013). Del ensayo de consolidación se puede determinar

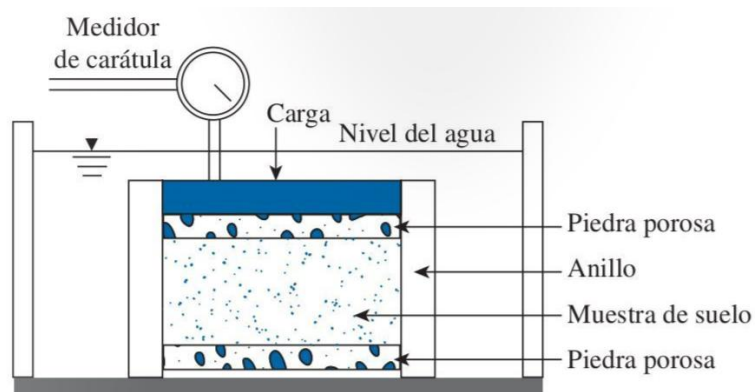


Figura 2.19: Cámara para consolidación unidimensional (Das, 2013)

los parámetros de compresibilidad como la presión de pre consolidación, el índice de

compresión, el índice de expansión, coeficiente de consolidación vertical, Coeficiente de compresibilidad volumétrica.

2.5.2. Parámetros de compresibilidad en consolidación unidimensional (1D)

Coeficiente de consolidación vertical (C_v)

El valor de C_v se denomina mediante el ajuste de las curvas de tiempo, experimentalmente y teórica. Dos métodos se han desarrollado para este propósito, uno depende de la raíz cuadrada del tiempo (Método de Taylor) y el otro del logaritmo del tiempo (Método de Casagrande).

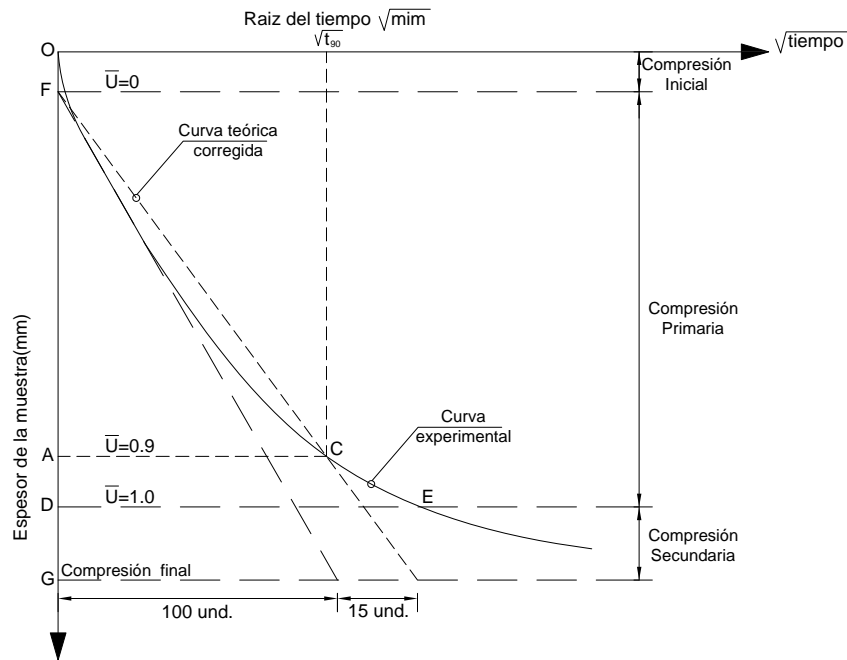


Figura 2.20: Compresión Inicial, Primaria y Secundaria de consolidación por Método de Taylor (Whitlow, 1976)

Al realizar la gráfica del asiento de la muestra vs tiempo se puede identificar 3 características principales de consolidación donde la muestra sufre deformaciones frente al esfuerzo que se aplica y tiempo de duración del esfuerzo como se ve en las figuras 2.20 y 2.21.

Características principales de consolidación unidimensional (1D) son:

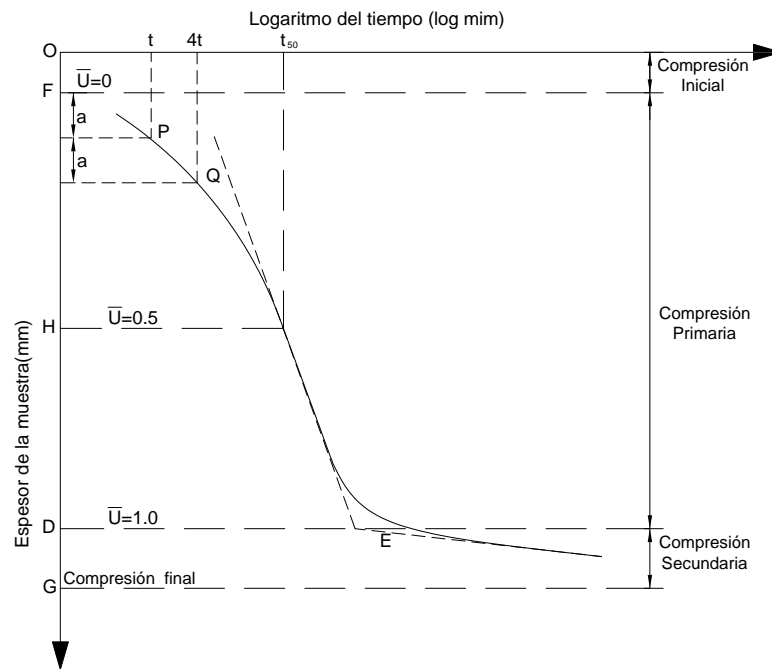


Figura 2.21: Compresión Inicial, Primaria y Secundaria de consolidación por Método de Casagrande (Whitlow, 1976)

1. **Compresión inicial:** Indicada por una línea curva corta, que resulta primordialmente de la compresión de cualquier proporción de aire que esté presente, o de una reorientación ligera de las partículas; se supone que durante esta etapa se expelen aire y no agua (Whitlow, 1976).
2. **Compresión primaria:** Que se inicia tan pronto como el agua se ha exprimido y extraído del suelo, y está representada por la porción de curva desde $\bar{U} = 0$, hasta aproximadamente $\bar{U} = 1,0$ (aunque también se presenta algo de compresión secundaria en esta etapa).

3. **Compresión Secundaria:** Indicada por la porción final curvada de la gráfica, es la expresión que continua produciéndose después que el exceso de presión del agua en los poros ha llegado a cero, y se cree que se debe a una reorientación retardada de las partículas causada por la alta viscosidad de las capas de agua adsorbida. Los métodos para determinar el coeficiente de consolidación vertical son:

Método de logaritmo del tiempo (Método de Casagrande).

Un método alternativo para determinar C_v , sugerido por Casagrande, se basa en una curva experimental en la cual se grafica el espesor con respecto al logaritmo de tiempo. La curva teórica consiste en tres partes; una curva inicial que esencialmente parabólica, una porción intermedia de línea recta y una curva final asintótica al eje del tiempo (Whitlow, 1976).

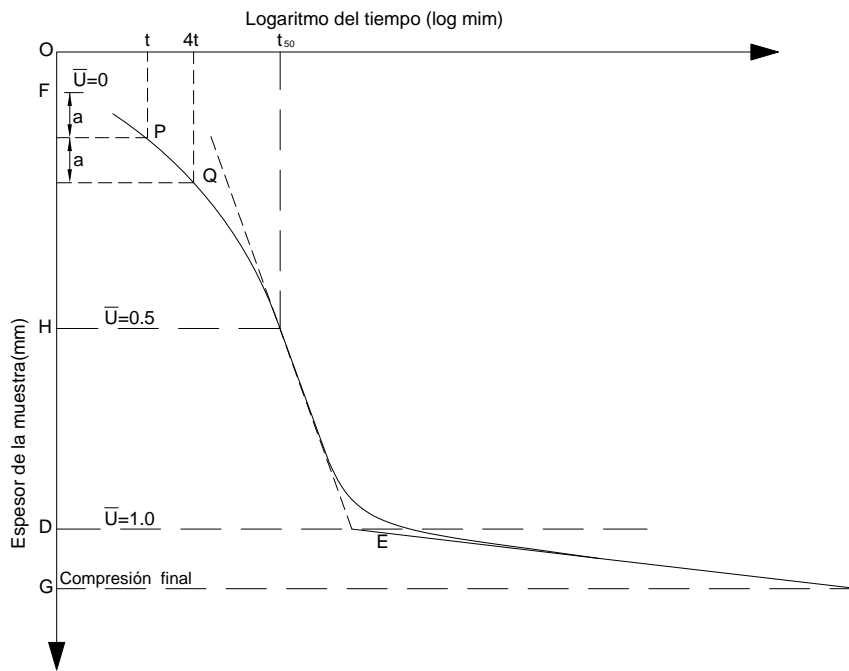


Figura 2.22: Curva teórica de consolidación por el método de logaritmo de tiempo (Whitlow, 1976)

Realizando los trazos respectivos en el figura 2.22 de la variación de espesor vs logaritmo

de tiempo resulta la siguiente relación para determinar el C_v :

$$C_v = \frac{T_{50} \cdot d^2}{t_{50}} \quad (2.74)$$

Método de la raíz cuadrada del tiempo (Método de Taylor). Cuando se grafica \bar{U} en función de $\sqrt{T_v}$, se obtiene una gráfica de línea recta con una pendiente $\sqrt{\frac{4}{\pi}}$ (fig. 2.23). Obsérvese que, cuando $\bar{U} > 0.6$, la curva comienza a desviarse de la gráfica de línea recta (Whitlow, 1976).

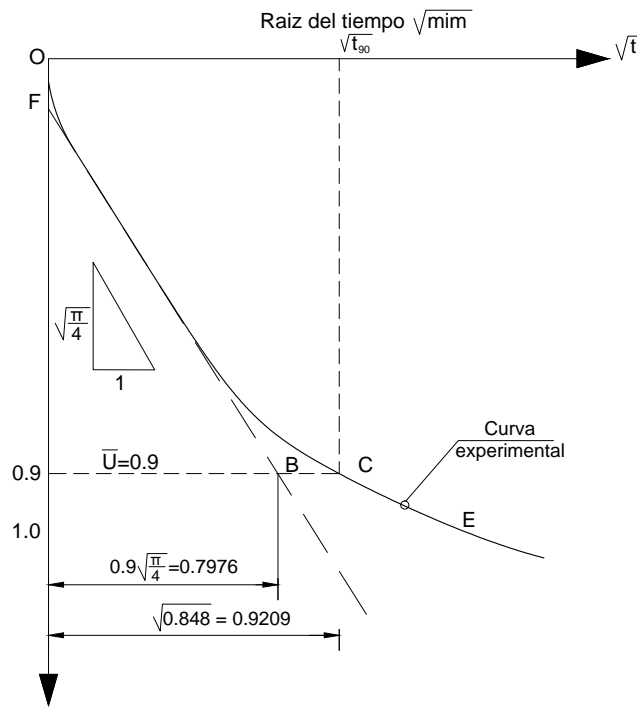


Figura 2.23: Curva teórica de consolidación por el método de raíz cuadrada del tiempo (Whitlow, 1976)

Realizando los trazos respectivos en la figura 2.23 de la variación de espesor vs raíz cuadrada del tiempo resulta la siguiente relación para determinar el C_v :

$$C_v = \frac{T_{90} \cdot d^2}{t_{90}} \quad (2.75)$$

Se ha determinado valores de coeficiente de compresibilidad para algunas arcillas como se muestra en el cuadro 2.7.

Cuadro 2.7: Valores de coeficiente de consolidación vertical (cm²/seg) (Lambe, 1972)

Límite Líquido	Límite inferior en la recompresión	Compresión Inalterada	Límite superior remodelada
30	3.5×10^{-2}	5×10^{-3}	1.2×10^{-3}
60	3.5×10^{-3}	1×10^{-3}	3×10^{-4}
100	4×10^{-4}	2×10^{-4}	1×10^{-4}

Coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v)

La relación entre el esfuerzo vertical efectivo y la relación de vacíos es ligeramente no lineal. El coeficiente de compresibilidad a_v se interpreta entonces como la pendiente de la cuerda en un rango determinado de esfuerzos efectivos. Esto es $a_v = \Delta e / \Delta \sigma'_v$. La relación de vacíos (e) se toma a partir de su valor inicial e_o al empezar el incremento.

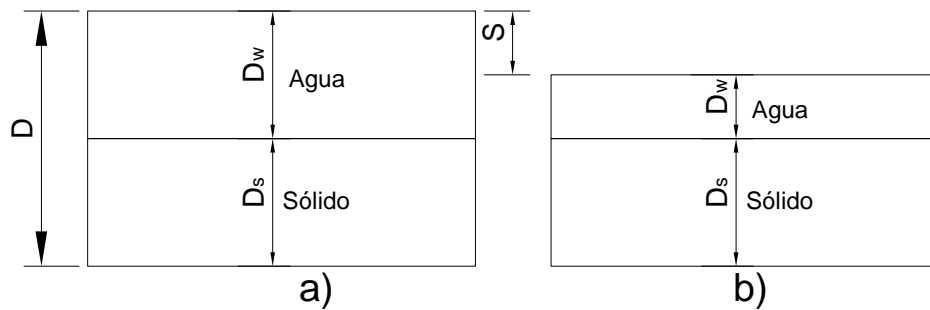


Figura 2.24: Representación de un elemento de suelo: a) antes de la consolidación, b) después de la consolidación (Berry, 1993)

Remplazando la ecuación (2.16) en la ecuación (2.23) resulta la siguiente ecuación:

$$m_v = \frac{\Delta e}{(1 + e)} \frac{1}{\Delta \sigma'_v} \quad (2.76)$$

Δe : Cambio total de la relación de vacíos causada por un incremento σ'_v de esfuerzo.

e : relación de vacíos promedio durante la consolidación.

Se ha determinado el coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v), para ciertos tipos de arcilla como el mostrado en el cuadro 2.8.

Cuadro 2.8: Compresibilidad y coeficiente de compresibilidad volumétrica (Rodríguez Serquén, 2016)

Compresibilidad	m_v (cm ² /kg)
Muy baja	Menor que 0.005
Baja	0.005 - 0.010
Media	0.010 - 0.030
Alta	0.030 - 0.150
Muy Alta	Mayor que 0.150

Permeabilidad

Es la facilidad de movimiento que tiene el agua en fluir entre las partículas de los suelos. Conociendo los valores de C_v y m_v , se procede a reemplazar los valores obtenidos en la ecuación (2.22) obteniendo el valor de la permeabilidad:

$$k_v = C_v m_v \gamma_v \quad (2.77)$$

Cuadro 2.9: Rangos de la permeabilidad hidráulica para identificar los suelos (Das, 2013)

Tipo de suelo	k (cm/seg)
Grava limpia	100-1
Arena gruesa	1.0-0.01
Arena fina	0.01-0.001
Arcilla limosa	0.001-0.00001
Arcillas	< 0.000001

Presión de pre consolidación (σ'_p).

La presión de pre consolidación σ'_p , también llamada presión de pre compactación o de precarga (Dawidowski and Koolen, 1994), es la máxima tensión a la que se ha visto sometido un suelo a lo largo de su historia geológica. Este parámetro presenta un gran interés geotécnico dado que separa las deformaciones elásticas, o recuperables, de las inelásticas o irreversibles, por lo que su correcta determinación es fundamental para el análisis de la respuesta del suelo (Tomás and Mira, 2010).

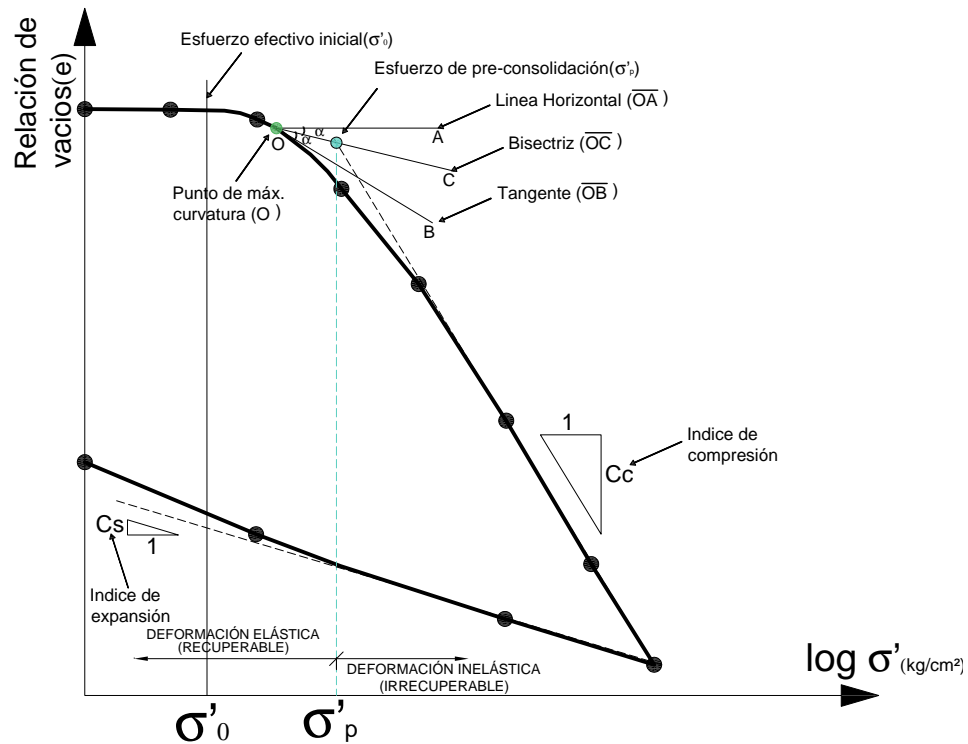


Figura 2.25: Tramo de deformación elástica, inelástica y curva $e - \log \sigma'$ - (Rodríguez Serquén, 2016)

Es importante determinar este parámetro, ya que mediante el valor obtenido de la gráfica Curva $e - \log \sigma'$, se podrá identificar si el suelo en estudio se encuentra normalmente consolidado si la presión de sobrecarga efectiva es igual a la presión de pre-consolidación y si la presión efectiva es menor que la presión de pre-consolidación entonces el suelo se

encontrara sobre consolidado. Para determinar la presión de pre-consolidación se utiliza un procedimiento grafico propuesto por Casagrande (1936) que comprende los siguientes pasos (Das, 2013).

1. Determinar el punto O en la Curva $e - \log \sigma'$ que tenga la curvatura más pronunciada (es decir el radio de curvatura menor).
2. Trace una línea horizontal OA.
3. Trace una línea OB que sea tangente a la curva $e - \log \sigma'$ en O.
4. Trace una línea OC que divida en dos partes iguales el ángulo AOB.
5. Prolongue la parte línea recta de la curva $e - \log \sigma'$ hacia atrás hasta intersectar OC, este es el punto D, la presión que corresponde a este punto D es la presión de pre consolidación.

Indice de sobre-consolidación (Over Consolidation Ratio-OCR).

Permite evaluar los diferentes procesos de esfuerzos a lo que ha sido sometido y soportado un estrato de arcilla es toda su etapa de formación. En los estratos de arcillas se presenta dos condiciones:

Normalmente Consolidado (NC), son aquel estrato que no ha tenido esfuerzos verticales mayores a lo que existe sobre ella.

Sobre-Consolidados (SC), son aquellos estratos que han estado sujetos a esfuerzos mayores a los actuales en todo el proceso de su formación. Se obtiene al relacionar el esfuerzo de pre-consolidación que adquiere luego del ensayo de consolidación con el esfuerzo natural encontrado o extraído la muestra antes del ensayo de consolidación.

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}$$

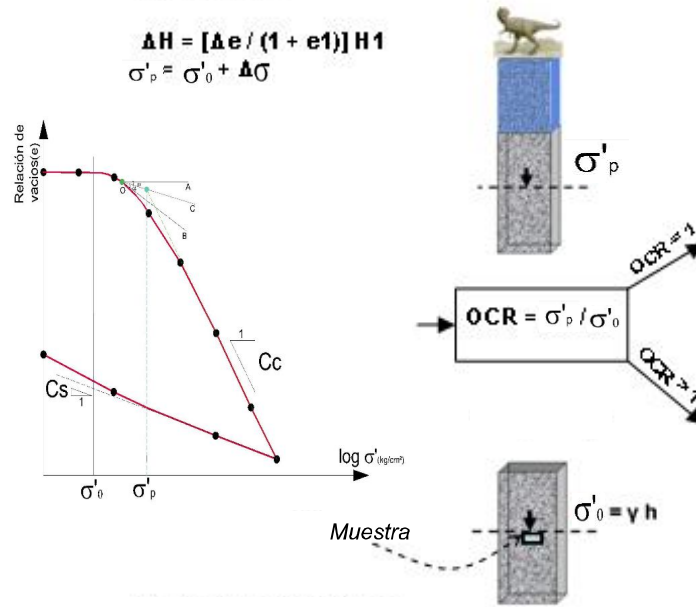


Figura 2.26: Definición de la relación de pre-consolidación (RSC), u Over Consolidation ratio (OCR)- (Rodríguez Serquén, 2016)

Dónde:

Si $OCR < 1$; Suelo subconsolidado.

Si $OCR = 1$; Suelo normalmente consolidado.

Si $OCR > 1$; Suelo preconsolidado o sobreconsolidado.

Índice de compresión (Cc).

Das (2013), refiere que el valor del valor del índice de compresión se puede determinar de la gráfica Curva $e - \log \sigma'$ y determinada por la pendiente de la parte lineal (la ultima parte) de la gráfica Curva $e - \log \sigma'$. Teniendo en consideración las definiciones ya mencionadas el índice de compresibilidad resulta de la siguiente relación:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_2} \right)} \quad (2.78)$$

Dónde:

e_1, e_2 son las relaciones de vacíos.

σ'_p esfuerzo de pre-consolidación.

σ' esfuerzo efectivo de diseño.

Cuadro 2.10: Compresión y expansión de suelos naturales (Das, 2013)

Suelo	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de compresión (Cc)	Índice de Expansión (Cs)	Cs/Cc
Arcilla Azul de Boston	41	20	0.35	0.07	0.2
Arcilla de Chicago	60	20	0.4	0.07	0.175
Arcilla de Fuente Gordon, Georjía	51	26	0.12	0.04	0.33
Arcilla de Orleáns	80	25	0.3	0.05	0.17
Arcilla de Montana	60	28	0.21	0.05	0.24

Índice de expansión (Cs).

Luego de realizar la descarga, el suelo experimenta una expansión lineal de pendiente positiva (ascendente) y cuando se vuelve a recargar el suelo experimenta una recompresión lineal de pendiente negativa (descendente) es de comportamiento elástico hasta llegar al punto de donde se inició la descarga y de allí en adelante inicia la compresión inelástica Whitlow (1976).

Del trazo de los datos de carga y recarga versus la deformación del suelo resulta el índice de expansión que está representado por la pendiente de parte de descarga de la curva $e - \log \sigma'$ (Das, 2013).

El valor de índice de consolidación se determina de la siguiente relación:

$$C_s = \frac{e_0 - e_1}{\log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \right)} \quad (2.79)$$

Dónde:

e_0, e_1, e_2 son las relaciones de vacíos.

σ'_0 esfuerzos efectivos inicial

σ'_p esfuerzo de pre-consolidación.

Los valores de índice de compresión y expansión son importantes en la determinación de los asentamientos que experimenta el suelo frente a las cargas solicitadas ya que influyen en el cálculo en la siguiente relación:

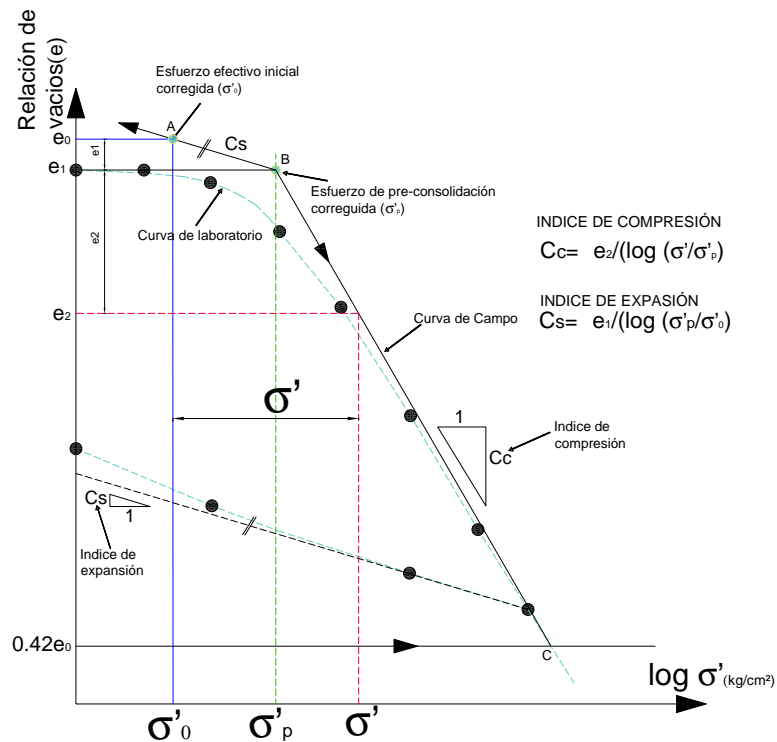


Figura 2.27: Corrección de la curva por método de Schmertmann- (Rodríguez Serquén, 2016)

$$S = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \right) + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_p} \right) \quad (2.80)$$

Para obtener la curva de compresibilidad de campo se usa el método de Schmertmann de acuerdo al procedimiento que muestra en la figura 2.27.

2.6. Normatividad en ensayos de consolidación unidimensional

Se puede realizar pruebas de laboratorio en muestras de arcilla saturada sin alterar según la Norma Técnica Peruana NTP 339.154, para determinar el asentamiento por consolidación ocasionada por varias cargas incrementales. Las muestras de prueba suelen ser de 50 mm como mínimo de diámetro y 12 mm de altura como mínimo. Menciona también que se tiene que aplicar una carga inicial de asiento para permitir el contacto uniforme en toda la superficie de contacto entre la piedra porosa y la muestra, a su vez se pueda transmitir las cargas en toda la superficie de la muestra, luego se procede aplicar cargas duplicando en cada incremento de carga durante 24 horas o a más. En la norma también señala que se realiza el control y registro de los tiempos y asientos que se van dando durante la aplicación y duración de cada carga.

Capítulo 3

Metodología para las isócronas de consolidación de la arcilla de Moya

3.1. Ubicación de la zona en estudio.

El estudio se realizó en los terrenos del Centro Educativo de Moya para la construcción de ambientes que albergara a beneficiarios de la misma, el Centro Educativo de Moya se encuentra de la Siguiete manera:

Lugar : Centro Educativo de Moya.

Localidad : Centro Poblado de Moya.

Distrito : Quinua.

Provincia : Huamanga.

Región : Ayacucho.

Las coordenadas de ubicación en UTM son E: 593,345.08 N: 8'559,459.75, en el cuadrante 27ñ, se adjunta plano de ubicación en el Anexo 13.



Figura 3.1: Ubicación de C.E. de Moya (toma Google Earth)

3.2. Equipos para la caracterización geotécnica.

Materiales y equipos para determinar humedad natural, límite líquido, límite plástico, gravedad específica, peso específico y clasificación del material:

- Recipientes para contenido de humedad (aluminio o latón).
- Balanza de sensibilidad de 0.01 g.
- Balanza de sensibilidad de 0.1 g.
- Horno con control de temperatura adecuada.
- Juego de tamices y bandeja.
- Copa de Casagrande y Acanalador.
- Botella de plástico blanco para proveer cantidades controladas de agua.

3.2. Equipos para la caracterización geotécnica.



Figura 3.2: Instrumentos para límite líquido

- plato evaporador de porcelana y espátula para mezcla del suelo con agua.
- placa de vidrio para ensayo de límite plástico.
- Picnómetro.



Figura 3.3: Determinación de gravedad específica

3.3. Equipos para ensayos de consolidación.

Los instrumentos y equipos necesarios para ensayo de consolidación son los siguientes:



Figura 3.4: Equipo para ensayo de consolidación

- Consolidómetro tipo CBR que cuenta con los siguientes instrumentos:
 - Micrómetro con lectura de 0.0001” de precisión.
 - Celda de carga Tipo “s” de 5 tn máximo.
 - Dos piedras porosas.
 - Recipiente Anular.
 - Pistón de carga.
 - Anillo rígido.
 - Gata manual de dos velocidades.
 - Extensómetro



Figura 3.5: Cámara de consolidación

- Marco de acero de alta resistencia de 4 columnas roscadas para la graduación de la altura
- Cronometro.
- Balanza de sensibilidad de 0.01 g.

3.4. Herramientas para las isócronas de consolidación.

Las herramientas computacionales para realizar la caracterización geotécnica y determinar los parámetros de consolidación fue en hojas de cálculo Excel y para realizar las gráficas de Isócronas de consolidación se ha elaborado una rutina en Matlab R2016a y exportados los valores obtenidos en Excel.

3.5. Metodología para la caracterización geotécnica.

3.5.1. Toma de muestras

El sondeo se realizó in situ en la localidad de Moya, distrito de Quinua, provincia de Huamanga, región Ayacucho, lugar donde se construirá el C.E. de Moya, específicamente en el lugar donde se ubicará su cimentación. Se recogió una sola muestra inalterada de entre la altura 1.20 m a 3.30 mts, determinando que el suelo era homogéneo y con pocas variaciones en sus características. La calicata de la cual se extrajo la muestra tuvo una dimensión de 1.5x2x3.30 m de profundidad. Una vez extraída la muestra esta se depositó en bolsas impermeables selladas, para luego trasladarlos al laboratorio para realizar los análisis y almacenarlo en un ambiente cerrado.

En la zona de estudio se construirá ambiente educativo de un nivel, se realizará la fundación sobre el estrato de arcilla, cuyas dimensiones de la zapata serán de 150 cm x150 cm y soportará una carga de 10 tn ejercida por la estructura.



Figura 3.6: Extracción de muestra

3.5.2. Contenido de humedad (ω)



Figura 3.7: Secado de muestras para determinar el contenido de humedad

Para obtener la humedad, se pesó los recipientes de aluminio o latón y se registró los valores obtenidos. Luego se tomó unas muestras representativas del suelo húmedo y se procedió a pesar la misma más el recipiente, para secar la muestra se puso al horno durante 8 horas a una temperatura promedio de 100 °C, transcurrido el tiempo y enfriado la muestra se volvió a pesar y se obtuvo el peso de la muestra seca más el recipiente. Es recomendable evitar pesar las muestras calientes ya que puede generar errores en la toma de datos. Se realizó de acuerdo a la Norma Técnica Peruana.

3.5.3. Limite líquido (LL)

La muestra utilizada se ha tamizado por la malla # 40 (0.42 mm) y se toma la muestra que ha pasado por dicha malla. Se ha iniciado el ensayo preparando una pasta de suelo en un recipiente de porcelana con diferentes humedades para cada prueba. Se preparó la copa de Casagrande asegurándose que esté seca y limpia, luego se monta la copa en su posición para el ensayo, en esta copa se debe colocar la masa de suelo entre 50 y 70 g,

3.5. Metodología para la caracterización geotécnica.

alisando la superficie con la espátula a una altura de 1 cm, evitando dejar burbujas de aire en la masa de suelo, después se utiliza el acanalador que dividirá en dos mitades simétricas la masa colocada en la copa, girar la manivela de manera uniforme y constante a una velocidad de dos revoluciones/seg; realizar este procedimiento hasta que el surco se cierre en 13 mm de longitud y tomar nota del número de golpes durante el proceso. Se ha repetido el proceso adicionando más agua o más muestras de suelo.



Figura 3.8: Ensayo para límite líquido en copa de Casagrande

Se pesa recipientes vacíos que contendrán a las muestras para el pesado antes y después del secado. En cada prueba se ha tomado una muestra de aproximadamente 5 g de suelo en la zona donde se cerró el surco y se procedió a realizar el pesado y luego el secado al horno durante 8 horas a una temperatura promedio de 100°C, pasado este tiempo se vuelve a pesar las muestras secas y se registra los datos.

Con los datos obtenidos de la humedad y número de golpes se realizó el gráfico semi-logarítmico de humedad v/s número de golpes que se describe más adelante. Se determina del grafico el límite líquido para 25 golpes.



Figura 3.9: Extracción de muestra para el contenido de humedad



Figura 3.10: Secado en horno de las muestras

3.5.4. Limite plástico (LP)

Se utilizó una porción del material que había sobrado del ensayo del límite líquido, con esta se formó bolitas de diámetro aproximadamente 1 cm y se amasó sobre el vidrio con la palma de la mano hasta formar bastoncitos de 3 mm de diámetro, en caso estos bastoncitos se quebraban antes de llegar a tener los 3mm de diámetro, se volvía a construir la bolita de 1 cm de diámetro uniendo el material con fuerte presión de las puntas de los dedos y

3.5. Metodología para la caracterización geotécnica.

amasar nuevamente el bastoncito hasta llegar al límite plástico.

El límite plástico corresponde al contenido de humedad para el cual un bastoncito de 3 mm, inicia a romperse en trozos de 0.5 a 1 cm de largo.

Se pesó recipientes vacíos que contendrían a las muestras para el pesado antes y después del secado. Se pesó inmediatamente el bastoncito y luego llevado al horno por 8 horas a una temperatura promedio de 100 °C cumplido el tiempo hay se pesó la muestra seca para determinar el contenido de humedad. Este proceso se realizó cuantas veces sea necesario para determinar el límite plástico por el promedio de todas las muestras realizadas.



Figura 3.11: Pesado de las Muestras Secas

3.5.5. Límite de contracción (LC)

Para ello se preparó una pasta con la muestra y con la humedad de límite líquido obtenido, luego se preparó un recipiente untando por toda la superficie con lubricante para evitar que se adhiera la muestra y se lleva a la balanza para registrar su peso. Se colocó la muestra en el recipiente en tres capas, se llevó a la balanza para registrar el peso de la muestra más recipiente, luego se procedió con el secado al ambiente de la muestras por 6

horas, una vez secado llevarlo al horno por 18 horas y dejarlo enfriar al ambiente, pesarlo y registrar el dato.

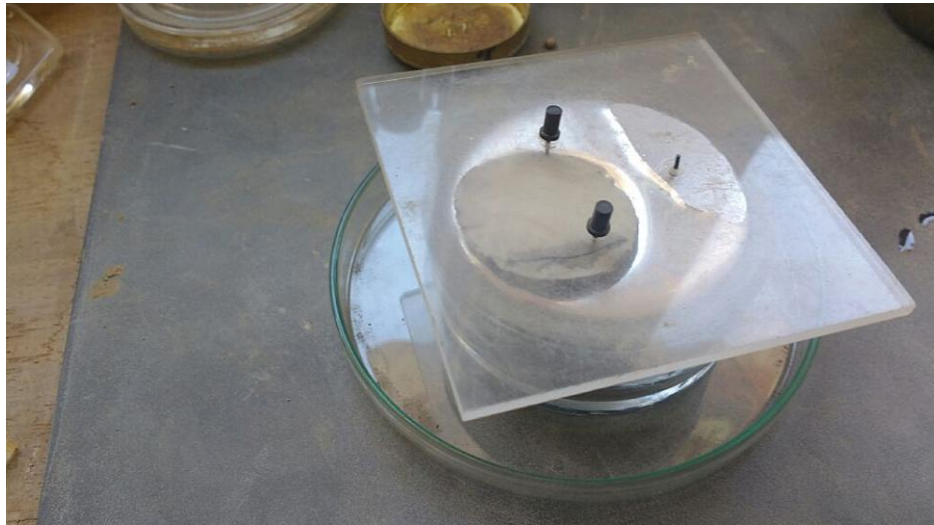


Figura 3.12: Ensayo de límite de contracción

Luego se determinó el volumen seco de la muestra por medio del desplazamiento en mercurio. Que consistió en colocar la muestra de arcilla sobre el recipiente de vidrio con mercurio, con la ayuda de la placa de vidrio con dos agujas, se recoge y se mide el volumen desplazado de mercurio en las probetas y se vuelve a llenar con mercurio el recipiente de vidrio para determinar por diferencias el volumen inicial de la muestra.

3.5.6. Gravedad específica (Gs)

Primeramente se calibró el picnómetro para ello se determinó el peso del picnómetro vacío y el peso del picnómetro con agua de 500ml. Se secó el espécimen expuesto al aire libre y al sol hasta obtener una masa que se pueda triturar en pequeñas partículas usando un mortero y la mano.

Se colocó el embudo en el picnómetro, y el pico del embudo estuvo extendido pasando la marca de calibración, luego se vertió directamente los sólidos del suelo en el embudo,

3.5. Metodología para la caracterización geotécnica.



Figura 3.13: Volumen de Mercurio desplazado por la muestra

se enjuagó cualquier partícula de suelo remanente en el embudo dentro del picnómetro usando un spray de lavado en una botella a presión.

Preparado la pasta aguada de suelo se añadió agua hasta que el nivel o marca que indicaba los 500 ml de volumen, se agitó el agua hasta que la pasta aguada se forme y elimine en su totalidad los gases, se pesó y se dejó asentar los sólidos y luego vaciar en un recipiente el contenido. Se enjuagó cualquier suelo adherido al picnómetro. El recipiente conteniendo



Figura 3.14: Llenado del picnómetro con muestra

la muestra se llevó al horno para el secado de la muestra y su posterior pesado.



Figura 3.15: Liberación de aire de la muestra

3.5.7. Clasificación de material fino

Se realizó el tamizado de la muestra lavada y retenida por la malla # 200, como el mayor porcentaje de las partículas de las muestras pasaron por la malla #200, la poca cantidad retenida nos permitió realizar la clasificación por medio de su granulometría. Se optó por los métodos de clasificación de materiales finos que dependen más de su Límites de consistencias por medio de cartas de plasticidad. Una vez obtenido los valores de Límite líquido y plástico se determinó el índice de plasticidad (IP) que es de la diferencia de Límite líquido con límite plástico. Teniendo los valores de LL e LP se fue a la carta de plasticidad

3.5. Metodología para la caracterización geotécnica.



Figura 3.16: Pesado de muestras lavada y retenidas por malla # 200

y se tomó como coordenadas los valores de LL e IP para determinar a qué grupo de suelos finos pertenece según la clasificación por método SUSC y AASHTO cuyos resultados se adjuntó en los Anexos. Con los datos obtenidos del porcentaje de arcilla que contiene la muestra por método de hidrómetro según la norma NTP 339.128 se procedió a clasificar e identificar las propiedades de la muestra determinando la Actividad de las arcillas. Los



Figura 3.17: Granulometría por sedimentación

procedimientos anteriores nos han permitido caracterizar la muestra de arcilla extraída

de la I. E. de Moya.

3.6. Metodología para el ensayo de consolidación

3.6.1. Preparación de la muestra

Se ha determinado y registró: la altura, diámetro interior y el peso del anillo de consolidación a usarse.

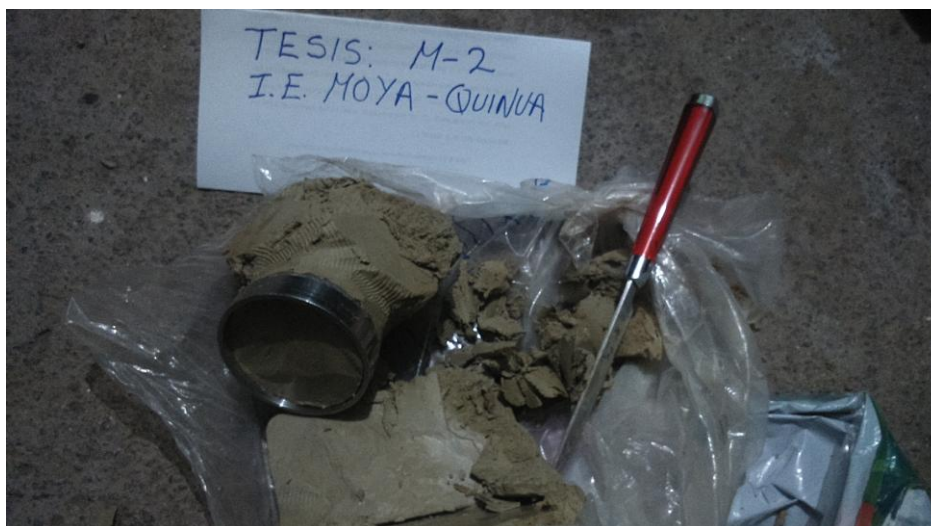


Figura 3.18: Preparado de la muestra inalterada

Se cortó una muestra de ensayo, cuyas dimensiones eran superiores al diámetro y altura del interior del anillo, luego se labró respetando la forma y sentido encontrado in situ, de tal forma que la estratigrafía tenga la misma orientación que el consolidómetro.

3.6.2. Colocación de la muestra en la cámara de consolidación.

Una vez colocada el anillo de consolidación sobre la muestra labrada, poco a poco se fue cortando y presionando la muestra hasta ajustarse a las dimensiones del anillo de consolidación y posteriormente remover el exceso de muestra con una cuchilla o sierra,



Figura 3.19: Muestra contenido en el anillo

la parte superior e inferior de la muestra hasta enrasar exactamente al nivel del borde del anillo de consolidación. Para determinar el peso de la muestra se pesó el anillo con la muestra de suelo y por diferencia con el peso del anillo sin muestra se obtuvo el peso de la muestra, este dato se registró.

Una vez lista la muestra tallada se procedió a humedecer las dos placas porosas durante dos minutos sumergido en agua para que se saturen para después colocarlas en ambas caras del anillo que contenía la muestra, se acomodó el anillo y las placas porosas en el recipiente anular, siempre teniendo cuidado de que estén bien centrados, sobre ella se colocó el pistón de carga asegurados con tornillos de fijación y se llenó con agua el recipiente anular, finalmente se puso en contacto la celda de carga con el Pistón de carga girando la palanca de la gata manual y colocando el micrómetro en una de las columnas de montaje la misma que se graduó en cero, se aseguraba que el extensómetro este en contacto con la superficie del recipiente anular.

Luego se puso en contacto la celda de carga con el pistón de carga girando la palanca de la gata manual. Seguidamente se coloca el micrómetro en una de las columnas de montaje ajustado con tornillos de sujeción y se gradúa en cero asegurándose que el extensómetro



Figura 3.20: Ensayo de consolidación

este en contacto con la superficie del recipiente anular.

3.6.3. Procedimiento del ensayo

Una vez montada la muestra en el equipo de consolidación, se colocó la carga de asiento (5 kg) bien alineado y se aseguró que la placa porosa y la muestra entren en contacto en toda su superficie, así mismo se volvió a regular el micrómetro a cero. Se aplicó las primeras cargas girando la palanca de la gata manual hasta que el indicador T31P registre la carga que requiere y se mantuvo girando para mantener constante la primera carga.

Manteniendo constante la primera carga se inicia las lecturas del micrómetro en intervalos de tiempo sugeridos como: 15, 30 y 45 seg., también de 1, 2, 4, 8, 15, 20, 30, 60, 90 y 120 minutos o hasta que se defina la consolidación primaria, a partir de la hora de aplicación inicial de la carga.

Terminado el proceso de consolidación para la primera carga, se procedió aumentar el doble de la primera carga las que se registró las lecturas del micrómetro para los tiempos establecidos. Se ha repetido el proceso penúltimo y último, para cargas de 20, 40, 80, 160, 320, 640 y 1280 Kg.



Figura 3.21: Ensayo de consolidación para cada ciclo de carga

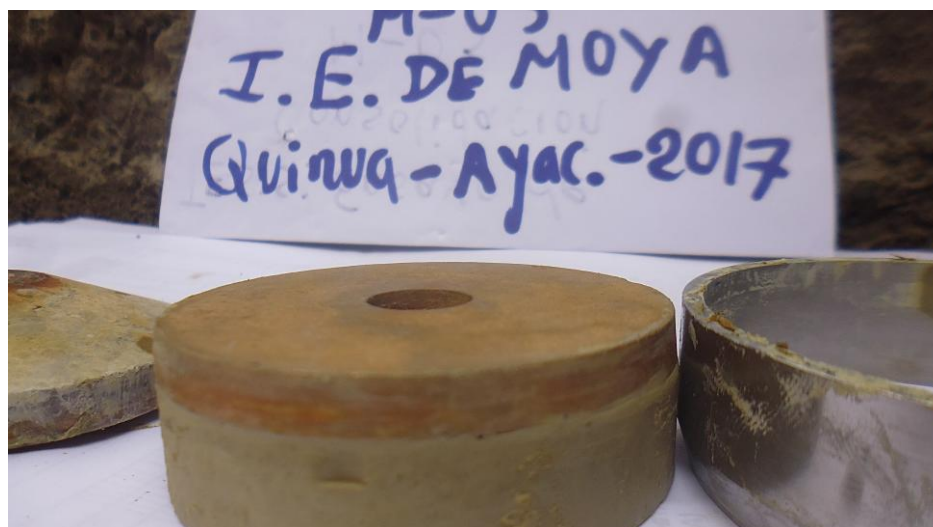


Figura 3.22: Asentamiento de la muestra después del ciclo de cargas

Para cada uno de los incrementos de presión, se llevó un registro del progreso de la deformación del suelo en función del tiempo, haciendo uso del micrómetro y del cronómetro respectivamente. Después de que la presión de 1280 Kg ha permanecido aplicada sobre el suelo 24 horas, se inició el proceso de descarga disminuyendo la presión a 320 Kg y luego a 80, 20 y 5 Kg. Entre cada una de las descargas dejar actuar la presión durante varias horas hasta observar que no haya variación en la lectura del micrómetro.

Terminado el ensayo se realizó el drenado del agua, el retirado de la celda de carga,

retirado del pistón de carga, se removi6 la muestra del recipiente anular, retirado de las piedras porosas, extracci6n del anillo con la muestra del suelo para seguidamente secar la superficie del anillo y la muestra de suelo determinando y registrando el peso del conjunto, finalmente se extrae la muestra del anillo la que se lleva a secar y se registra el peso.

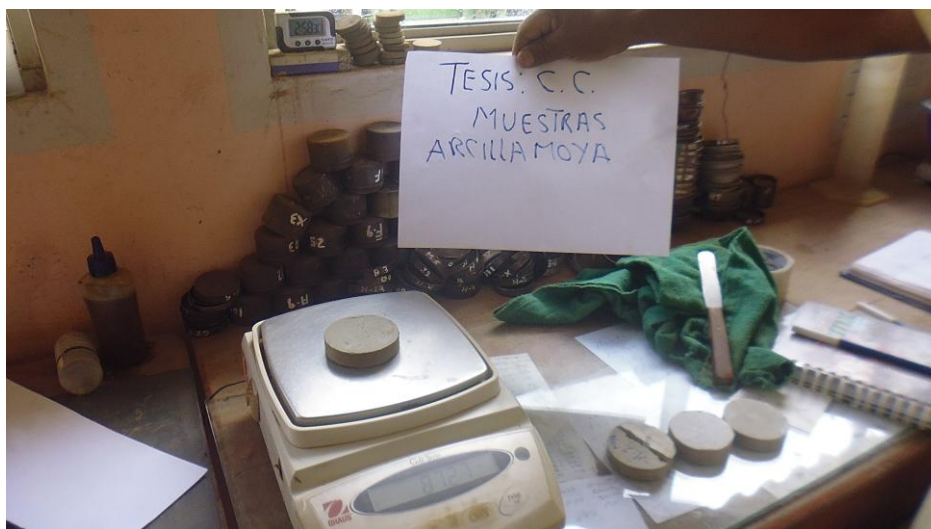


Figura 3.23: Pesado de la muestra al terminar el ensayo

3.6.4. Procedimiento para determinar los parámetros de consolidación

Se ha determinado los parámetros de consolidación usando la hoja de cálculo Microsoft Excel, siguiendo los siguientes procedimientos.

Se ha ingresado y digitalizado los datos obtenidos del ensayo en el consolid6metro tipo CBR, como se muestra en el cuadro 3.1, y se ha graficado los valores por el M6todo de Casagrande donde en el eje de las abscisas (x) se ingresa los valores de logaritmo del tiempo en minutos y en el eje de las ordenadas (y) las variaciones de espesor en pulgadas a consecuencia de los esfuerzos aplicados como se muestra en la figura 3.24 se muestra para cargas de entre 20 a 1280 Kg. Para determinar el coeficiente de consolidaci6n vertical para la carga 20 kg. aplicada sobre la muestra en la c6mara de consolidaci6n, se ha utilizado el

Cuadro 3.1: Datos obtenidos del ensayo de consolidación

TIEMPO	LECTURA (Pulg.)						
	20Kg	40Kg	80Kg	160Kg	320Kg	640Kg	1280Kg
	0.58Kg/cm2	1.17Kg/cm2	2.34Kg/cm2	4.69Kg/cm2	9.38Kg/cm2	18.76Kg/cm2	37.52Kg/cm2
	0.0416	0.0589	0.0891	0.1298	0.1690	0.2089	0.2475
0.10	0.0418	0.0660	0.0992	0.1329	0.1791	0.2093	0.2486
0.25	0.0420	0.0661	0.0993	0.1329	0.1792	0.2109	0.2502
0.50	0.0421	0.0671	0.0994	0.1335	0.1802	0.2110	0.2504
1.0	0.0423	0.0672	0.0995	0.1343	0.1804	0.2112	0.2505
2.0	0.0429	0.0676	0.0996	0.1350	0.1805	0.2122	0.2509
4.0	0.0435	0.0681	0.0997	0.1360	0.1808	0.2134	0.2513
8.0	0.0441	0.0691	0.1001	0.1375	0.1812	0.2145	0.2515
15.0	0.0450	0.0699	0.1018	0.1390	0.1822	0.2159	0.2529
30.0	0.0465	0.0710	0.1051	0.1417	0.1847	0.2188	0.2572
60.0	0.0485	0.0736	0.1090	0.1455	0.1867	0.2230	0.2592
120.0	0.0509	0.0772	0.1155	0.1505	0.1917	0.2272	0.2659
240.0	0.0538	0.0815	0.1211	0.1570	0.1977	0.2368	0.2712
480.0	0.0562	0.0856	0.1251	0.1635	0.2027	0.2408	0.2759
720.0	0.0572	0.0876	0.1274	0.1657	0.2057	0.2428	0.2784
1140.0	0.0581	0.0882	0.1281	0.1663	0.2067	0.2448	0.2799
1440.0	0.0584	0.0886	0.1287	0.1670	0.2076	0.2461	0.2809
2880.0	0.0587	0.0889	0.1294	0.1680	0.2085	0.2468	0.2819
4320.0	0.0589	0.0891	0.1298	0.1690	0.2089	0.2475	0.2824
Δh	0.0173	0.0302	0.0407	0.0392	0.0399	0.0386	0.0349

método de Casagrande donde se ha seguido los siguientes procedimientos: Se ha graficado los datos registrados del ensayo de consolidación controlados en los intervalos de tiempo de acuerdo a lo que exige la norma, en el eje de las abscisas va el logaritmo de tiempo en minuto y en eje de las ordenadas los asentos en milímetro registrados en diferentes intervalos de tiempo.

Del gráfico se ha determinado el asiento h_{100} para t_{100} , este indica las coordenadas del punto “E” obtenidas de la intersección de las rectas de la parte lineal del tramo compresión primaria con el tramo lineal de compresión secundaria.

Para determinar el asiento inicial h_0 , se escogió dos puntos “P” y “Q” que se encuentren dentro del tramo parabólico, que debe cumplir que el valor de la abscisa de “Q” sea cuatro veces del abscisa de “P” ($4t_P = t_Q$), del cual la ordenada del punto “F” del asiento inicial

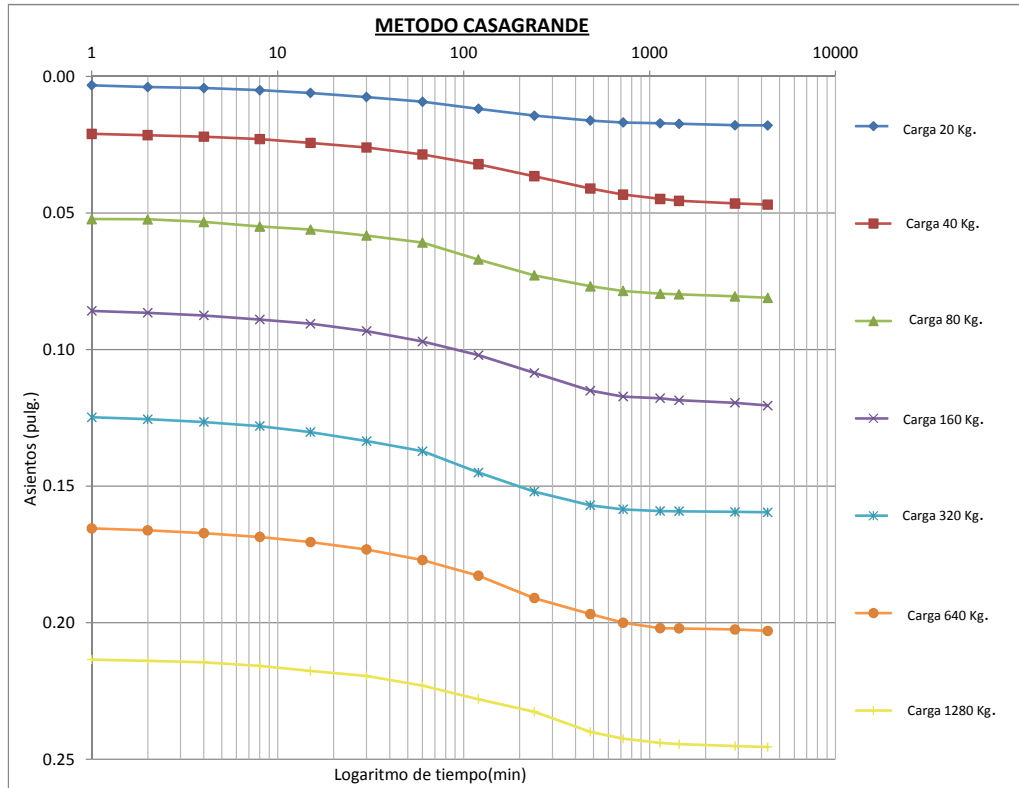


Figura 3.24: Gráfico para el método de Casagrande

es igual a la diferencia del valor doble de la ordenada de “P” con el valor de la ordenada “Q” ($h_0 = 2h_P - h_Q$).

Para determinar el valor de la coordenada G (t_{50}, h_{50}), primeramente se determinó el valor de la ordenada del asiento al 50% (h_{50}), que resulta del promedio del valor de la ordenada de los puntos “E” y “F” ($h_{50} = \frac{h_{100} + h_0}{2}$).

Luego se procedió a determinar el valor de la abscisa del punto “F” (t_{50}), que resulta al intersectar el valor de la ordenada “F” (h_{50}) con las líneas que se formaron con los puntos obtenidos de los asentamientos para diferentes tiempos y logaritmo de tiempo. Luego para obtener el valor de coeficiente de consolidación vertical se reemplazó los valores obtenidos en la ecuación (2.72), en la figura 3.25 se muestra la Hoja de cálculo Excel para determinar C_v .

ANEXO 10

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE VERTICAL DE CONSOLIDACION (Anexo 08)

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

Carga: 0.58kg/cm²

Ensayo : 01

Diametro del anillo	6.59 cm
---------------------	---------

Altura del anillo	h 2.1 cm
-------------------	----------

t _p	1 min
t _q	4 min

Parte lineal	Inicio 120 min	Final 240 min
--------------	----------------	---------------

Tiempo (min)	Espesor (pulg)	Espesor (mm)
0.1	0.0024	0.0610
0.25	0.0027	0.0686
0.5	0.003	0.0762
1	0.0032	0.0813
2	0.0038	0.0965
4	0.0042	0.1067
8	0.005	0.1270
15	0.006	0.1524
30	0.0075	0.1905
60	0.0092	0.2337
120	0.0118	0.2997
240	0.0143	0.3632
480	0.0161	0.4089
720	0.0168	0.4267
1140	0.0171	0.4343
1440	0.0173	0.4394
2880	0.0178	0.4521
4320	0.0179	0.4547

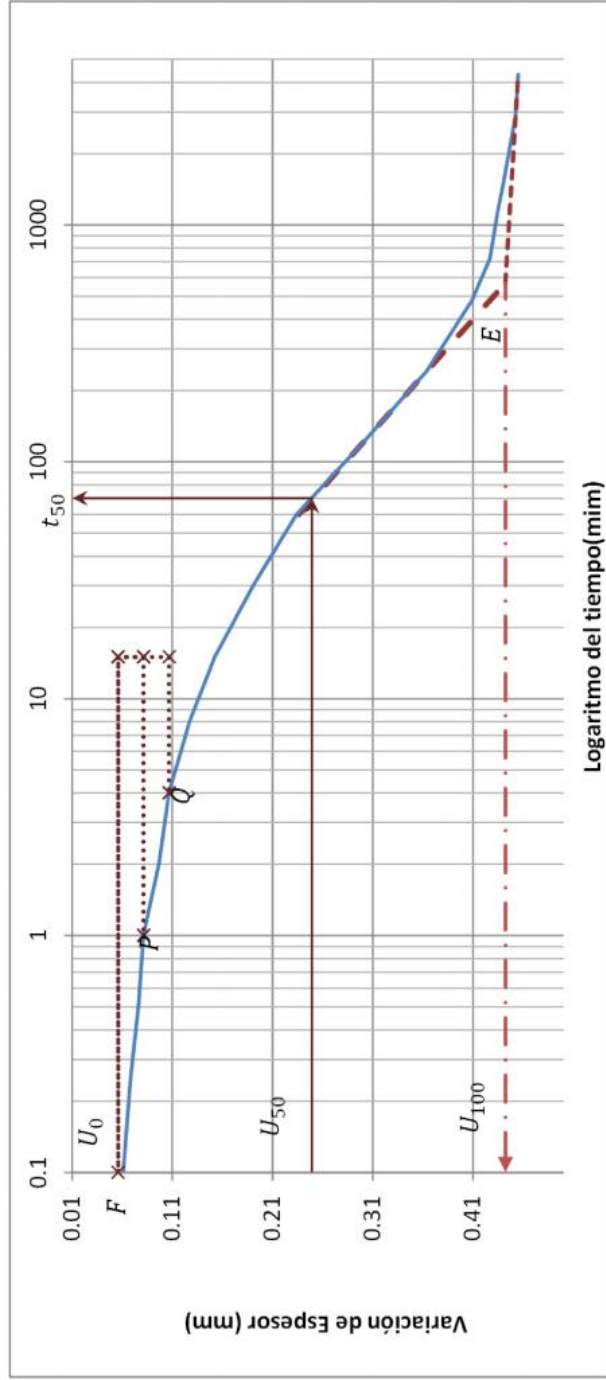


Figura 3.25: Hoja de cálculo en Excel para determinar C_v

Se procedió a determinar los valores de pre consolidación, coeficiente de compresibilidad volumétrica e índice de compresión.

Con los asientos obtenidos del ensayo de consolidación durante mayor a 24 horas en cada carga se obtiene los asientos totales en cada siglo de carga, con dichos valores de ha determinado la compresibilidad volumétrica se ha utilizado la (2.76) y para determinar la relación de vacíos de utilizado la ecuación 3.1.

$$e = e_0 - \Delta e = e_0 - \frac{\Delta h}{h_0} (1 + e_0) \quad (3.1)$$

Después de haber determinado la relación de vacíos se realizó la gráfica de la curva $e - \log \sigma'$, en hoja de cálculo Excel, como se muestra en la figura 3.26, la gráfica se obtiene al ingresar los valores de relación de vacíos en la ordenada y esfuerzos en la abscisa. Se

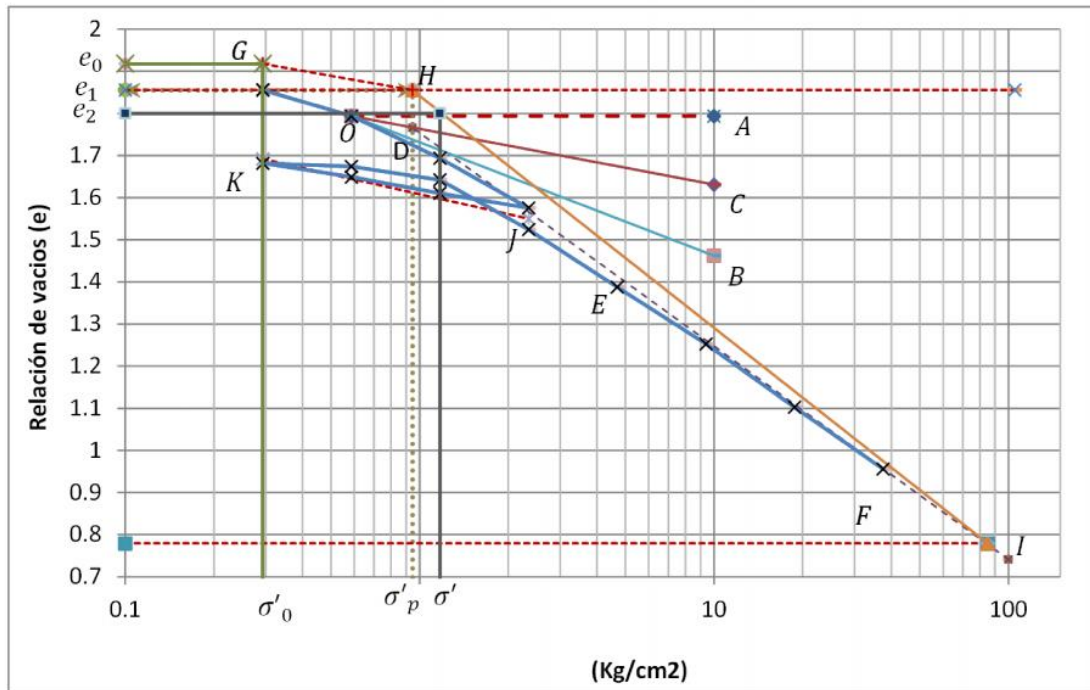


Figura 3.26: Determinación del esfuerzo de pre-consolidación de la gráfica $e - \log \sigma'$ en Hoja de Cálculo Excel.

ha trazado una recta OA paralela a la recta abscisa que intersecte el menor radio de

Cuadro 3.2: Hoja de cálculo para determinar relación de vacíos (e) y coeficiente de compresibilidad volumétrica m_v

σ' (Kg/cm ²)	$\Delta\sigma'$ (Kg/cm ²)	Lec. Dial (pulg.)	Esp. muest. (mm)	Δh (mm)	Δe	e	$\log\sigma'$	$\Delta e/\Delta\sigma'$	m_v (cm ² /Kg)
0.29		0.0000	21.00			1.855			
	0.29			-0.45	-0.062			-0.2109	-0.0755
0.59		0.0179	20.55			1.794	-0.23		
	0.59			-0.74	-0.100			-0.1708	-0.0634
1.17		0.0290	19.81			1.694	0.07		
	1.17			-0.87	-0.118			-0.1004	-0.0390
2.35		0.0341	18.94			1.576	0.37		
	-1.17			0.25	0.035			-0.0295	-0.0113
1.17		-0.0100	19.20			1.610	0.07		
	-0.59			0.28	0.039			-0.0660	-0.0249
0.59		-0.0112	19.48			1.649	-0.23		
	-0.29			0.24	0.033			-0.1119	-0.0417
0.29		-0.0095	19.72			1.682	-0.53		
	0.29			-0.06	-0.008			-0.0259	-0.0097
0.59		0.0022	19.67			1.674	-0.23		
	0.59			-0.24	-0.032			-0.0548	-0.0207
1.17		0.0093	19.43			1.642	0.07		
	1.17			-0.87	-0.118			-0.1004	-0.0398
2.35		0.0341	18.56			1.524	0.37		
	2.35			-1.00	-0.136			-0.0582	-0.0244
4.69		0.0395	17.56			1.388	0.67		
	4.69			-0.99	-0.135			-0.0288	-0.0128
9.38		0.0391	16.57			1.253	0.97		
	9.38			-1.10	-0.150			-0.0160	-0.0076
18.76		0.0434	15.47			1.103	1.27		
	18.76			-1.08	-0.147			-0.0078	-0.0040
37.53		0.0426	14.38			0.956			

curvatura del grafico obtenido con los valores de logaritmo de esfuerzos vs relación de vacíos que tiene origen en el punto “O”.

Luego se ha trazado una recta tangente OB a la curva $e - \log\sigma'$, la pendiente de la recta está dada por la primera derivada de la función parabólica ajustada por métodos numéricos de los datos que están dentro de la curva identificada en el gráfico y a su vez la recta OB tiene origen en el punto “O”. Luego se ha determinado la recta bisectriz OC que forman entre las rectas OA y OB , las coordenadas se obtuvo realizando operaciones trigonométricas con las coordenadas de los puntos “O”, “A” y “B”, primeramente se obtuvo el ángulo que se forma entre las rectas OA y OB , luego el ángulo se dividió a la

mitad y se volvió hacer operaciones trigonométrías para ya obtener las coordenadas del punto “C”.

Finalmente se traza una recta resultado del ajuste de los valores $e - \log \sigma'$ del tramo lineal, que prolongando intersecta a la recta bisectriz en el punto “D”, de la coordenada del punto D se obtiene que el esfuerzo de pre consolidación está dada por la abscisa del punto “D”. El Índice de compresibilidad se obtiene del resultado del ajuste de los valores de $e - \log \sigma'$ del tramo lineal EF . El coeficiente de compresibilidad volumétrica se ha determinado con los valores obtenidos del ensayo de consolidación, utilizando la ecuación (2.74), que relaciona la variación de esfuerzos y relación de vacíos como se muestra en el cuadro 3.2. Luego determinado los esfuerzos de pre consolidación se realiza los trazos de las rectas GH y HI de acuerdo al método de Schmertmann para determinar los índices de compresión y expansión.

3.6.5. Procedimiento para las isócronas de consolidación con Matlab R2016a

Para el graficado de las isócronas, fue necesario realizar una secuencia de rutinas en Matlab R2017a, para ello se determinó previamente los algoritmos que definen la consolidación y se ha seleccionado dos procedimientos, la primera que consiste en método analítico y el otro métodos numéricos. Para el método analítico fue necesario resolver la ecuación diferencia parcial (2.21) por método de separación de variables y series de Fourier obteniendo como solución la ecuación (2.45). Se elaboró una rutina en Matlab R2017a, donde es necesario el ingreso de datos valores de Esfuerzo (en Kg/cm²) para la cual se va evaluar la consolidación, luego pide el ingreso de Coeficiente de consolidación vertical (C_v) y altura (cm) del estrato que se quiere evaluar, por último pide el ingreso del tiempo (min) como en la figura 3.25, el tiempo en la rutina elaborado es variable por lo cual se puede evaluar para diferentes tiempos.

3.6. Metodología para el ensayo de consolidación

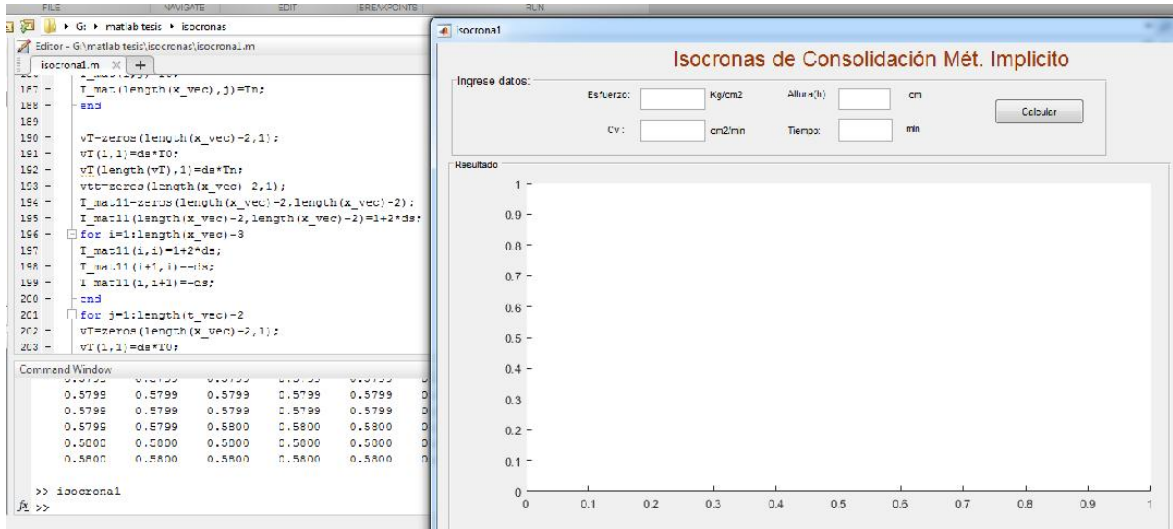


Figura 3.27: Ventana para ingresar datos en Matlab R2016a

A su vez la rutina en Matlab R2016a arroja un gráfico y valor de cómo va transmitiendo los esfuerzos en el estrato en el tiempo que dura el proceso de consolidación. La rutina en Matlab R2017a, también exporta los resultados en una tabla de Excel.

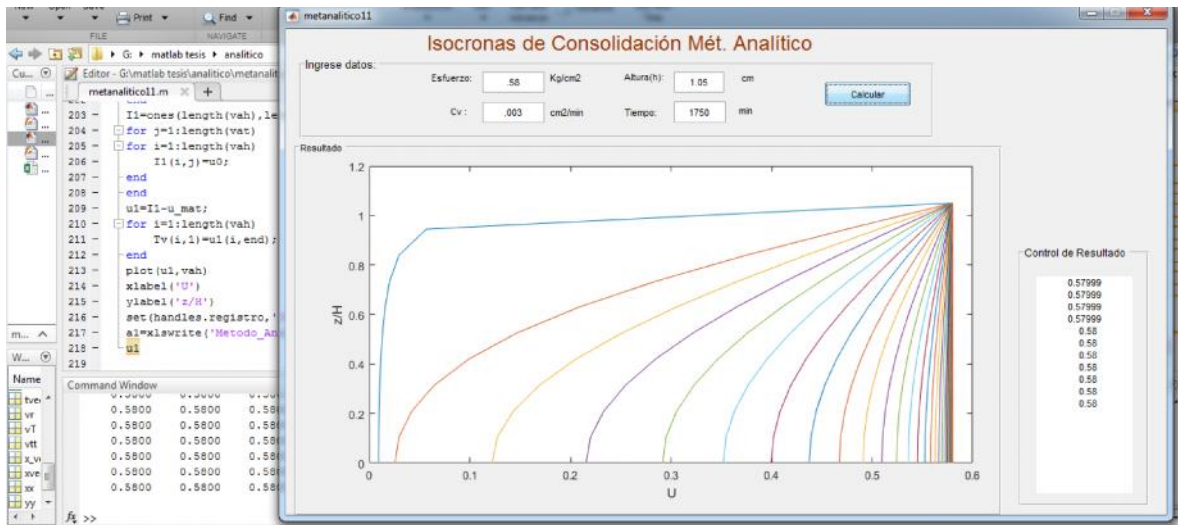


Figura 3.28: Resultado que arroja en Matlab R2016a

Para métodos numéricos se ha resuelto la ecuación diferencia parcial (2.21) con el método de diferencias finitas donde existen dos métodos aproximados de solución de las ecuaciones diferenciales parabólicas.

- Método implícito utilizando la ecuación (2.56).
- Método de Crank-Nicholsón utilizando la ecuación (2.66).

En la parte de métodos numéricos se ha resuelto la ecuación diferencia parcial (2.21) con el método de diferencias finitas, utilizando dos métodos aproximados de solución que tienen buena convergencia a los resultados de solución de las ecuaciones diferenciales parabólicas y que son las siguiente:

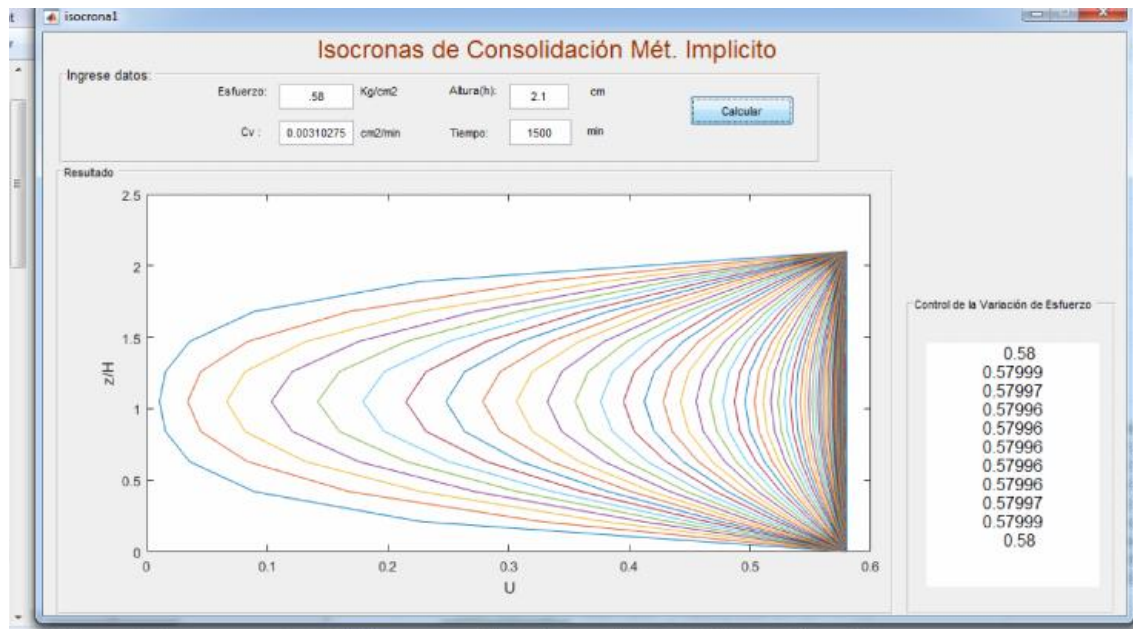


Figura 3.29: Resultado con diferencias finitas-método implícito en Matlab R2016a

Para la rutina en Matlab R2017a, se ingresaron los mismos datos de ingreso como esfuerzo (Kg/cm²) para la cual se va evaluar la consolidación, luego se ingresó el Coeficiente de consolidación vertical (C_v) en cm²/min y altura (cm) del estrato que se quiere evaluar, por último se ingresó el tiempo (min), el tiempo en la rutina elaborada es variable por lo cual se puede evaluar para diferentes tiempos.

A su vez la rutina en Matlab R2017a arroja un gráfico y valor de cómo va transmitiéndose los esfuerzos en el los diferentes estratos y tiempos, asimismo exporta los resultados en una tabla de Excel.

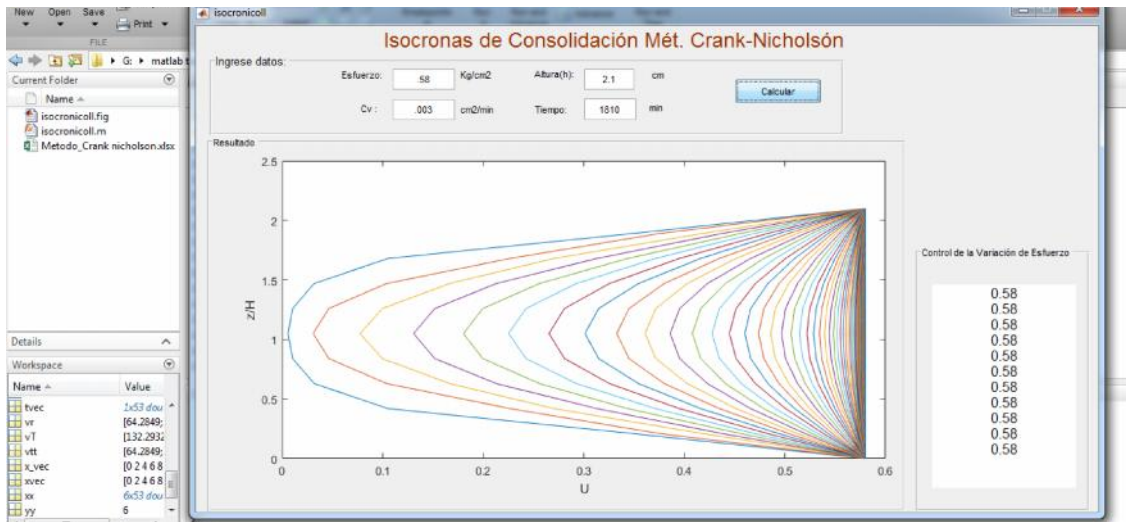


Figura 3.30: Resultado con diferencias finitas-método Crank-Nicholsón en Matlab R2016a

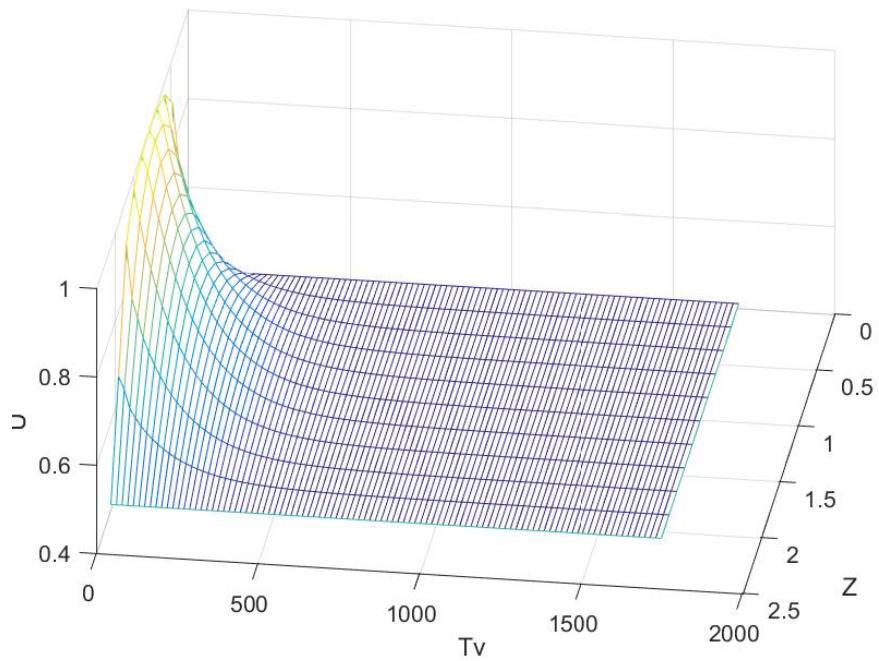


Figura 3.31: Gráfico 3D de las isócronas de consolidación en Matlab R2016a en escala aritmética.

3.6.6. Diagrama de flujo para las isócronas de consolidación con Matlab R2016a

En los figuras 3.32, 3.33 y 3.34, se muestra los diagramas de flujo.

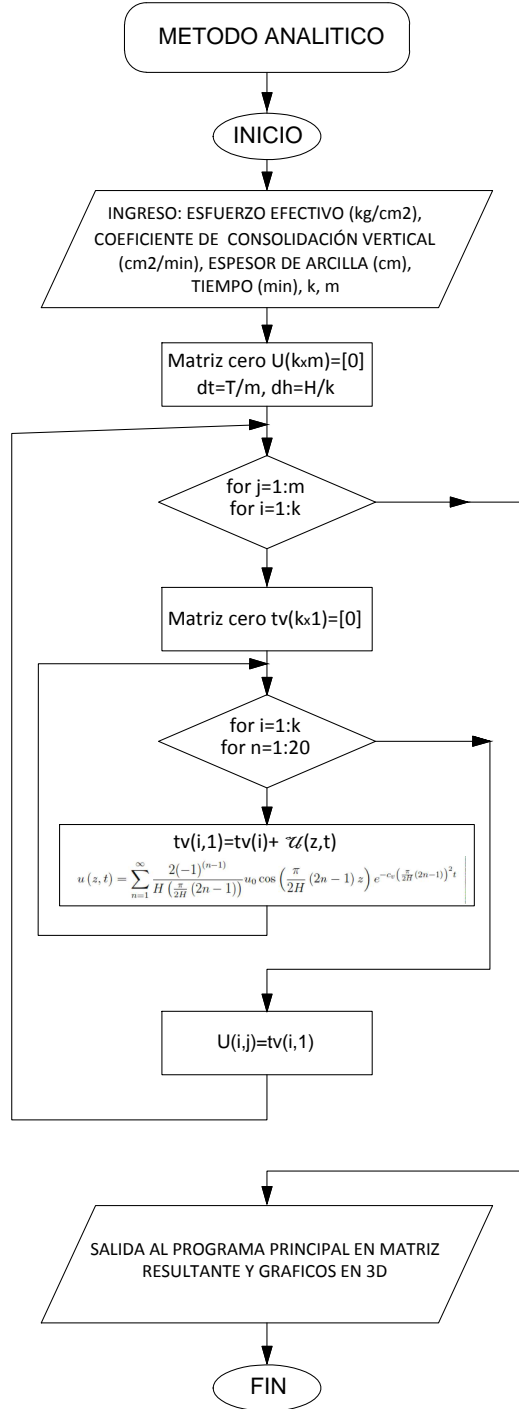


Figura 3.32: Diagrama de flujo para método analítico.

3.6. Metodología para el ensayo de consolidación

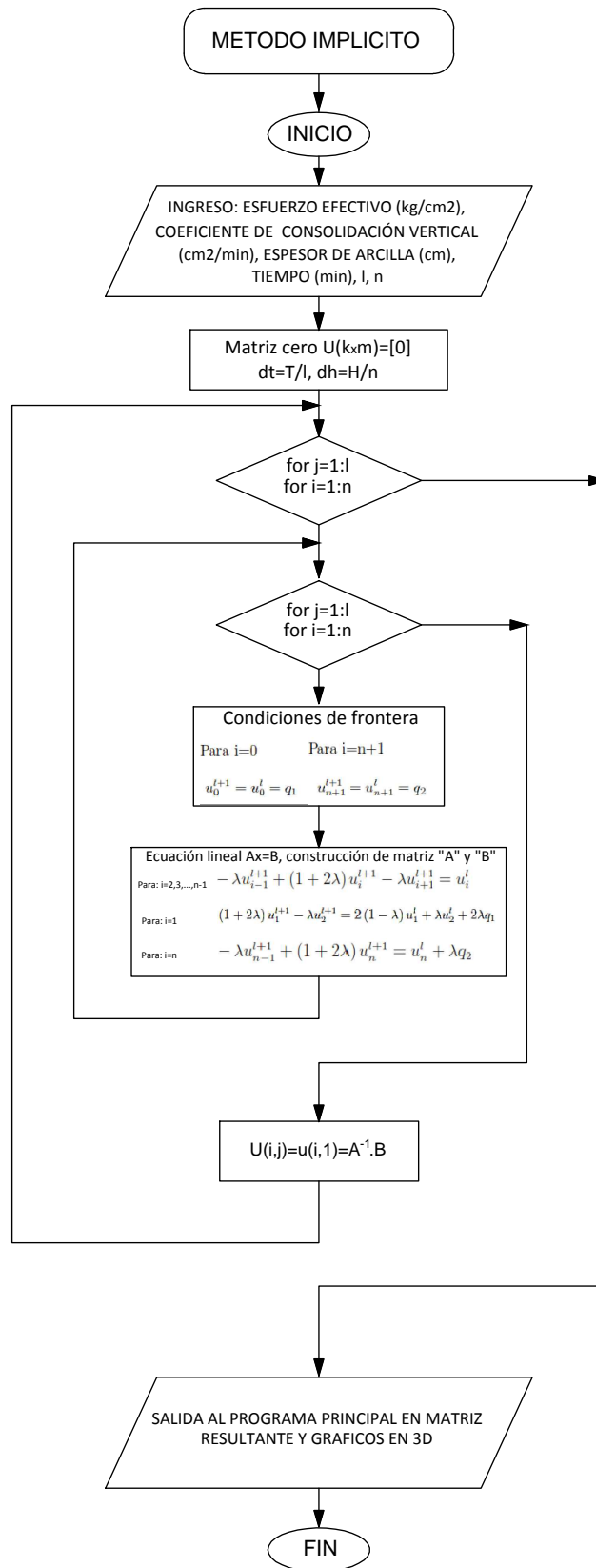


Figura 3.33: Diagrama de flujo para método implícito.

3.6. Metodología para el ensayo de consolidación

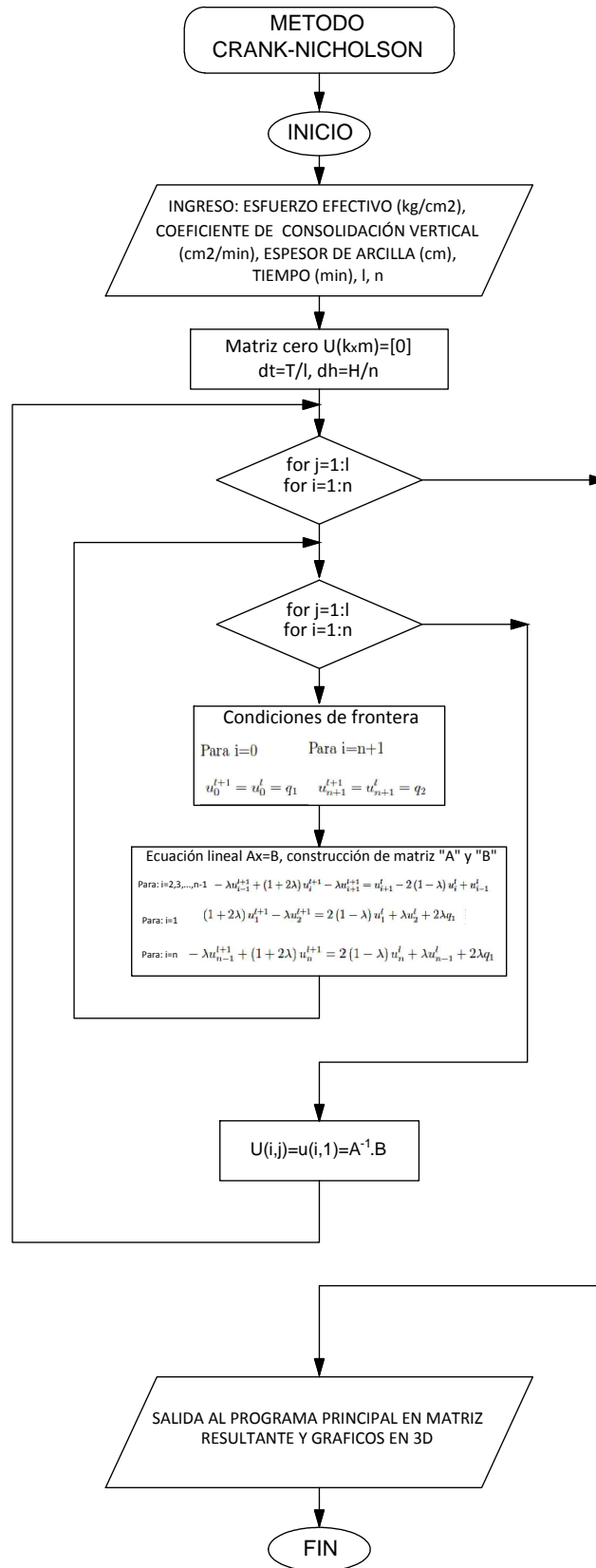


Figura 3.34: Diagrama de flujo para método Crank-Nicholson.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Geología del Centro Poblado de Moya.

De acuerdo a las investigaciones realizadas por INGEMMET y publicados en Boletín N° 61: Geología del cuadrángulo de Ayacucho, hoja ñ27, hace referencia que fueron estudiadas y cartografiadas por Mégard y Paredes (1972, inédito; en Morche et al., 1995) luego por Palacios, O. (1979), y Mégard et al, (1984). Ha sido cartografiada siguiendo diferentes metodologías, habiéndose distinguido para el presente estudio a una pila sedimentaria grano-decreciente dividida en dos secuencias Miembro Inferior y Superior:

Del plano geológico se adjunta en Anexo 14, se define la presencia de Formaciones de Ayacucho y está formado de los siguientes estratos:

El miembro Inferior están formados por:

Nn-ayi/tb3, Toba con matriz de ceniza color rosada y pómez de a 2 cm de diámetro.

Nn-ayi/tb2, Nivel de toba, toba lítica con clastos de material volcánico y matriz de ceniza color blanquecino.

Nn-ayi/tb1, Nivel de Toba. Toba de ceniza color blanquecina presenta bastante oxidación por meteorización.

Nn-ayi/tb, Secuencia de Tobas proximales.

Nm-ayi, Secuencia sedimentaria de color amarillento, conformada mayormente por estratos de arena y limos, resultantes de erosión de rocas piro-clásticas, se encuentran también intercalaciones de conglomerados con clastos de naturaleza volcánica.

El Miembro Superior está formado por:

Nm-ay_s, Tobas re-transportadas intercaladas con limos y arenas con presencia de diatomitas también hay presencia de algunos conglomerados.

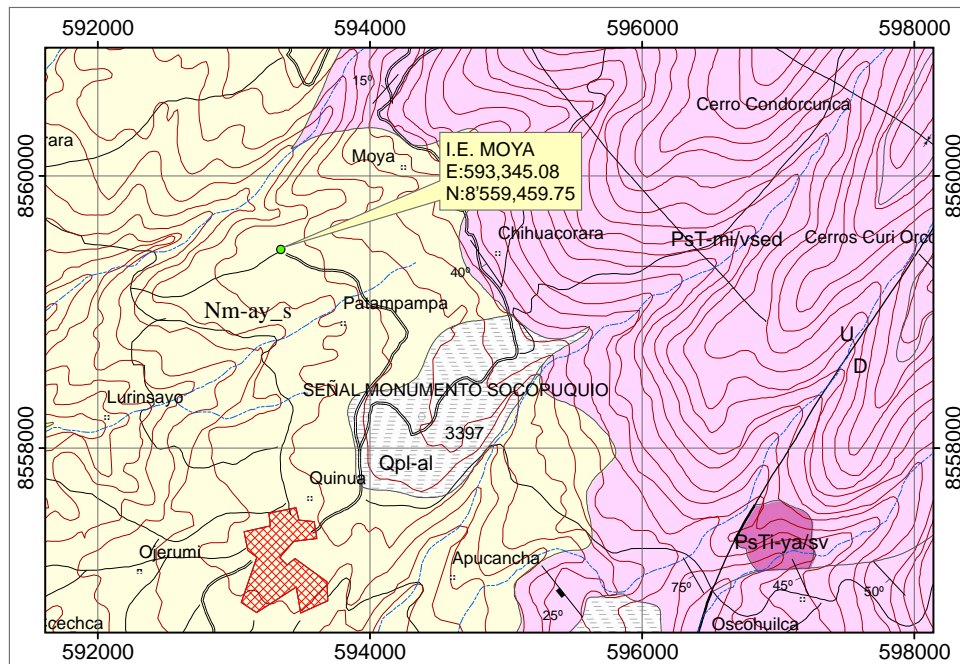


Figura 4.1: Geología del Centro Poblado de Moya

Edad Y Correlación.

En la publicación de INGEMMET, hace referencia que la edad y correlación de la Formación Ayacucho es:

A esta posición por su posición estratigráfica que sobre yace en discordancia angular a la Formación Huanta del Mioceno inferior, se le da una edad de Mioceno medio a superior.

4.2. Caracterización geotécnica de la arcilla del C.E. de Moya.

Mégard et al. (1984), obtuvieron edades entre 6.3 y 6.7 m.a. para las tobas de la Formación Ayacucho (miembro inferior), las que muestran ser aparentemente demasiado jóvenes, considerando que están infrayaciendo a las lavas del miembro superior, cuyas dataciones radiométricas son de 7.2 y 7.7 m.a. (Mégard et al., 1984).

Del estudio realizado por INGEMMET y lamina que se anexa, la zona de estudio tiene la formación geológica Ayacucho superior **Nm-ay_s**, donde se identifica que hay presencia de limo y arenas con presencia de Diatomitas.

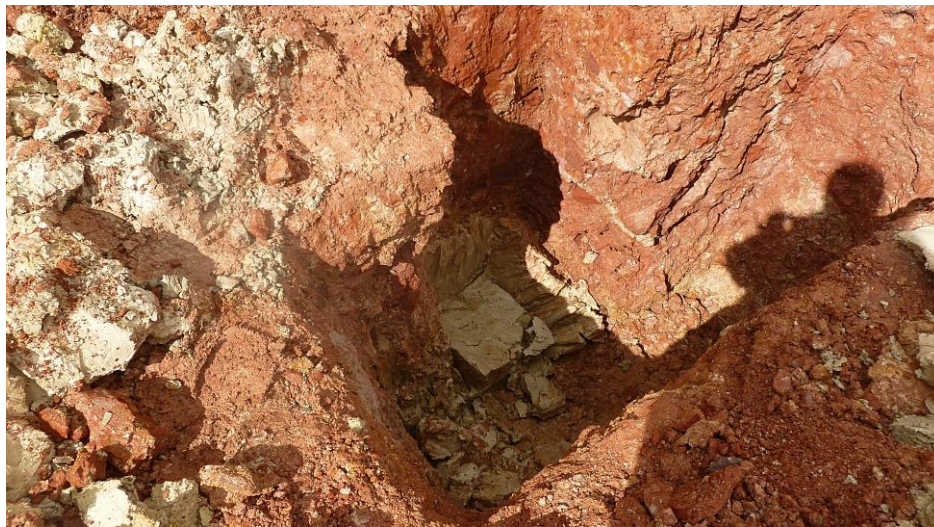


Figura 4.2: Muestra inalterada in situ de la arcilla de Moya

4.2. Caracterización geotécnica de la arcilla del C.E. de Moya.

Cuadro 4.1: Resumen del resultado del tamizado de las muestras

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA				
Muestra	Ensayo-1	Ensayo-2	Ensayo-3	Ensayo-4
% FINOS:	99.88	99.98	99.87	99.87
% ARENA:	0.12	0.02	0.13	0.13
% GRAVA:	0.00	0.00	0.00	0.00

4.2. Caracterización geotécnica de la arcilla del C.E. de Moya.

Las muestras seleccionadas y tamizadas resultaron que las partículas que pasan la malla # 200 en promedio es el 99.80 % de la muestra cómo se presenta en el siguiente cuadro 4.1 y los resultados se adjunta en Anexo 01.

De la muestra para granulometría se determinó la humedad natural obteniendo los resultados que se muestra en el cuadro 4.2 y los resultados se adjunta en anexo 01.

Cuadro 4.2: Resumen de contenido de humedad natural

HUMEDAD NATURAL				
Muestra	Ensayo-1	Ensayo-2	Ensayo-3	Ensayo-4
% :	38.59	33.33	37.41	43.40

En los ensayos para determinar los límites de Atterberg se realizaron 04 ensayos para determinar límite líquido y plástico y obtuvieron los siguientes valores (Anexo 02):

Cuadro 4.3: Resumen de contenido de límite líquido

LIMITE LIQUIDO				
Muestra	Ensayo-1	Ensayo-2	Ensayo-3	Ensayo-4
LL(%) :	109.15	107.80	105.04	105.04

Cuadro 4.4: Resumen de contenido de límite Plástico

LIMITE PLASTICO				
Muestra	Ensayo-1	Ensayo-2	Ensayo-3	Ensayo-4
LP(%) :	40.28	40.28	40.53	42.10

De los valores obtenidos de LL y LP se determina el índice de plasticidad mediante la siguiente operación $IP=LL-LP$, el índice de plasticidad promedio es 65.962 %, el resultado se muestra en el siguiente cuadro 4.5.

Los valores de límite líquido y plástico nos han permitido realizar las clasificaciones por SUCS y AASHTO, la clasificación de la muestras no permite la clasificación por medio de

4.2. Caracterización geotécnica de la arcilla del C.E. de Moya.

Cuadro 4.5: Valores de índice de plasticidad

INDICE DE PLASTICIDAD				
Muestra	Ensayo-1	Ensayo-2	Ensayo-3	Ensayo-4
IP(%) :	68.87	67.52	64.51	62.94

los tamices, ya que las partículas de las muestras son muy finas que pasó más del 99 % la malla # 200. Siendo necesario realizar la clasificación por medio de cartas de plasticidad (SUCS) y el Ábaco de Casagrande (AASHTO). De las cartas de plasticidad resulta que la muestra es Arcillas Inorgánicas “CH” según SUCS y Arcillas de alta plasticidad “A-7-5” según AASHTO, como se presenta en el cuadro 4.6 y adjunta en el Anexo 03.

Cuadro 4.6: Clasificación según SUCS y AASHTO

Clasificación de Suelos Finos				
Muestra	LL(%)	IP(%)	SUCS	AASHTO
Ensayo-01	109.15	68.87	Arcillas Inorgánicas (CH)	Arcillas de Alta Plasticidad (A-7-5)
Ensayo-02	107.80	67.52		
Ensayo-03	105.04	64.51		
Ensayo-04	105.04	62.94		

Realizado el ensayo límite de contracción a la muestra, se determinó que el límite de contracción es de 9.60 %. Resultado del ensayo de granulometría por sedimentación es 89.8 % de arcilla. Remplazando en la ecuación (2.2) se obtiene la Actividad (A) de arcillas:

$$A = \frac{65.962\%}{89.8\%} = 0.734$$

Determinado el valor de la Actividad de arcillas y del cuadro 2.3 se determina que se encuentra entre los rangos 0.5 a 7.2 y que el índice plástico es mayor a 50 %, teniendo en

4.2. Caracterización geotécnica de la arcilla del C.E. de Moya.

cuenta los rangos del cuadro 2.3, resulta que la arcilla presenta las propiedades similares a la características de una arcilla del tipo **Montmorillonita**.

A su vez se determinó la gravedad específica de la muestra, cuyo valor promedio es 2.68 gr/cm³, se encuentra entre los rangos 2.65 a 2.80 del cuadro 2.5, se encuentre dentro de una la arcilla es del tipo **Montmorillonita**.

Cuadro 4.7: Resumen de la caracterización geotécnica de la arcilla de Moya.

CARACTERISTICAS	RESULTADO	DESCRIPCION
Límite Líquido (LL)	106.757 %	Según el LL y LP en la carta de plasticidad la muestra de suelo es una arcilla Inorgánica de alta plasticidad "CH" y del cuadro 2.2 decimos que la muestra del Suelo de Moya tiene características de una arcilla Montmorillonita.
Límite plástico (LP)	40.797 %	
Índice de plasticidad (IP)	65.96 %	
Límite de contracción (LC)	9.60 %	Del LC y según al cuadro 2.2 la muestra tiene características de una arcillas Montmorillonita por que se encuentra entre los rangos de 8.5 a 15.
Granulometría por Tamizado	99.80 %	Por su granulometría la muestra obtuvo un elevado porcentaje de finos que pasa la malla # 200, esto indica que esta muestra es una arcilla.
Granulometría por sedimentación	89.8 %	Por el ensayo se obtuvo un elevado porcentaje de finos menores a 2 micrómetros, esto indica que esta muestra es una arcilla.
Gravedad Específica (Gs)	2.68 gr/cm ³	Con la Gs de 2.68 gr/cm ³ y el cuadro 2.5, la muestra se encuentra entre el rango 2.65 a 2.80 gr/cm ³ que indica característica de una arcilla Montmorillonita
Actividad (A)	0.734	Del cuadro 2.3 y el IP 40.80% se determina que la muestra de Moya contiene los minerales que compone una Montmorillonita
Potencial de expansión	Muy alto	Del L.L 106.76 %, I.P 40.80% y la actividad 0.734, decimos que el potencial de expansión de la muestra del C.E Moya es muy alto, por ende es malo para realizar una fundación sobre ellas sin previo tratamiento.

4.3. Determinación de los parámetros de consolidación unidimensional (1D).

Los resultados del ensayo de consolidación se muestra en los cuadros 4.8 y 3.1 y se adjunta en el Anexo 05 Y 09.

Cuadro 4.8: Resultados del ensayo de consolidación para ensayo-01

TIEMPO	LECTURA (Pulg.)						
	20Kg	40Kg	80Kg	160Kg	320Kg	640Kg	1280Kg
Minutos	0.58Kg/cm2	1.17Kg/cm2	2.34Kg/cm2	4.69Kg/cm2	9.38Kg/cm2	18.76Kg/cm2	37.52Kg/cm2
	0	0.0179	0.0469	0.0810	0.1205	0.1596	0.2030
0.10	0.0024	0.0204	0.0518	0.0842	0.1240	0.1640	0.2125
0.25	0.0027	0.0205	0.0520	0.0844	0.1242	0.1645	0.2129
0.50	0.0030	0.0207	0.0521	0.0850	0.1245	0.1650	0.2132
1.0	0.0032	0.0210	0.0522	0.0858	0.1248	0.1655	0.2135
2.0	0.0038	0.0215	0.0523	0.0865	0.1255	0.1662	0.2140
4.0	0.0042	0.0220	0.0532	0.0875	0.1265	0.1672	0.2145
8.0	0.0050	0.0229	0.0549	0.0890	0.1280	0.1686	0.2158
15.0	0.0060	0.0243	0.0560	0.0905	0.1302	0.1705	0.2177
30.0	0.0075	0.0260	0.0582	0.0932	0.1335	0.1732	0.2195
60.0	0.0092	0.0285	0.0608	0.0970	0.1372	0.1771	0.2230
120.0	0.0118	0.0321	0.0670	0.1020	0.1450	0.1828	0.2280
240.0	0.0143	0.0365	0.0728	0.1085	0.1520	0.1910	0.2326
480.0	0.0161	0.0410	0.0768	0.1150	0.1570	0.1968	0.2400
720.0	0.0168	0.0432	0.0785	0.1172	0.1585	0.2000	0.2425
1140.0	0.0171	0.0448	0.0795	0.1178	0.1591	0.2020	0.2440
1440.0	0.0173	0.0455	0.0798	0.1185	0.1592	0.2021	0.2445
2880.0	0.0178	0.0465	0.0805	0.1195	0.1594	0.2025	0.2452
4320.0	0.0179	0.0469	0.0810	0.1205	0.1596	0.2030	0.2456
Δh	0.0179	0.0290	0.0341	0.0395	0.0391	0.0434	0.0426

Del ensayo de consolidación se ha determinado el Peso específico inicial y final de la muestra, los resultados se presenta en el cuadro 4.9 y se adjunta en el Anexo 05.

Cuadro 4.9: Resultados de la humedad y peso específico inicial y final del ensayo

	Muestra 1		Muestra 2	
	Inicio	Final	Inicio	Final
Humedad. (%)	63.147	23.198	62.14	27.95
Peso específico (gr/cm3)	1.046	1.488	1.02	1.55

4.3. Determinación de los parámetros de consolidación unidimensional (1D).

Se ha determinado el coeficiente de consolidación vertical para los esfuerzos efectivos 0.59 y 1.17 kg/cm², por método de Casagrande, el resultado se muestra en el cuadro 4.10 y se adjunta los resultados en el Anexos 6, 7, 10 y 11.

Cuadro 4.10: Valores obtenidos de C_v de los datos obtenidos del ensayo de consolidación.

Esfuerzo (Kg/cm ²)	Ensayo-0 1		Ensayo-0 2	
	C_v (cm ² /min)	t_{100} (min)	C_v (cm ² /min)	t_{100} (min)
0.59	0.003103	566.729	0.002715	649.519
1.17	0.001645	981.033	0.001810	707.607

Resultado de relación de vacíos y coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v), se muestra en el cuadro 4.11, se adjunta el resultado de la hoja de cálculo Excel en Anexo 12.

Cuadro 4.11: Valores de compresibilidad volumétrica (m_v) y relación de vacíos (e).

Esfuerzo efectivo (Kg/cm ²)	Lectura del dial (pulg.)	Espesor de la muestra (mm)	e	m_v (cm ² /Kg)
0.2932	0.00	21.000	1.86	
0.59	0.0179	20.55	1.794	-0.0755
1.17	0.0290	19.81	1.694	-0.0634

Resultado de la permeabilidad para los valores $C_v = 0.003103$ cm²/min, $m_v = 0.0364$ cm²/Kg y peso específico $\gamma_v = 1.046$ gr/cm³ para esfuerzo efectivo 0.58 Kg/cm², resulta al remplazar en la ecuación (2.77):

$$k_v = 0.003103 * 0.0364 * 0.001046 = 1.181 * 10^{-7} \text{ cm/ min}$$

4.3. Determinación de los parámetros de consolidación unidimensional (1D).

De la curva $e - \log \sigma'$, se determinó los valores de esfuerzo de pre consolidación, el índice de compresión y expansión de campo por método de Schmertmann para los esfuerzos efectivos 0.59 kg/cm² y 1.17 kg/cm², se muestra en el cuadro 4.12. Los asentamientos se han determinado con la ecuación (2.80).

El estrato de arcilla de Moya se encuentra en un estado sobreconsolidado ya que el **OCR= 3.25 > 1**.

Cuadro 4.12: Resumen de los parámetros de consolidación.

DESCRIPCIÓN	RESULTADO	
Esfuerzo efectivo	0.59 kg/cm ²	1.17 kg/cm ²
Coficiente de consolidación vertical (C _v)	0.003103 cm ² /min	0.001645 cm ² /min
Coficiente de compresibilidad volumétrica (m _v)	0.0755 cm ² /kg	0.0637 cm ² /kg
Permeabilidad (k) (cm/min)	1.181x10 ⁻⁷	1.107x10 ⁻⁷
Esfuerzo efectivo de pre-consolidación	0.945 kg/cm ²	0.945 kg/cm ²
Esfuerzo efectivo Inicial	0.290 kg/cm ²	0.290 kg/cm ²
Relación de vacíos Inicial e ₀	1.9179	1.9179
Relación de vacíos de pre consolidación (e ₁)	1.8555	1.8555
Relación de vacíos final (e ₂)	1.8900	1.8000
Índice de Compresión (C _c)	-0.16864	-0.59836
Índice de Expansión (C _s)	-0.12163	-0.12163
Asientos (S)	2.008 cm	8.486 cm

4.4. Resultado de las isócronas de consolidación.

Para esfuerzo de 0.58 Kg/cm², $C_v = 0.003103$ cm²/min, 2.10 cm de espesor de la muestra, el tiempo es variable. En el método analítico y implícito solo se presentara la toma del resultado final como se muestran en las figuras 4.3 y 4.4 respectivamente.

Para el método analítico la altura para este caso se considera la mitad $h = 1.05$ cm por que la ecuación determinada es con condiciones de drenaje simple. Los resultados obtenidos

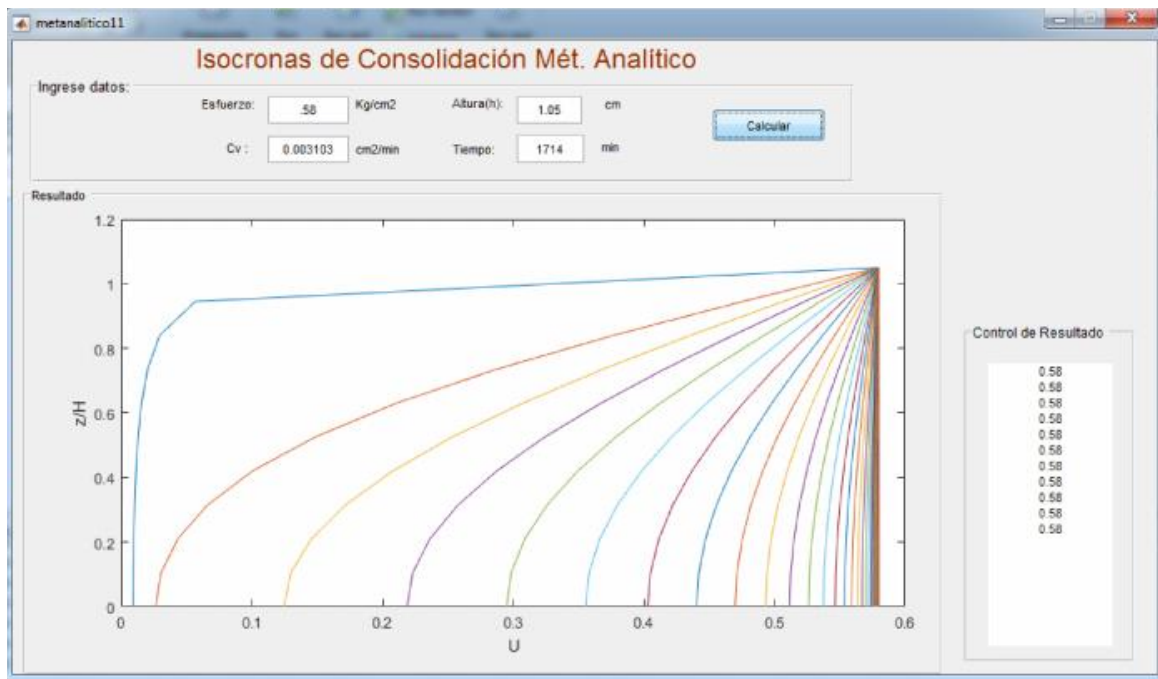


Figura 4.3: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 1714 min, método analítico Matlab R2016a.

por el Método de Crank- Nicholón se presenta en las figuras 4.5, 4.6 , 4.7 y 4.10. Y en los cuadros 4.13, 4.14 y 4.15, muestra los resultados que se ha obtenido por los tres métodos.

4.4. Resultado de las isócronas de consolidación.

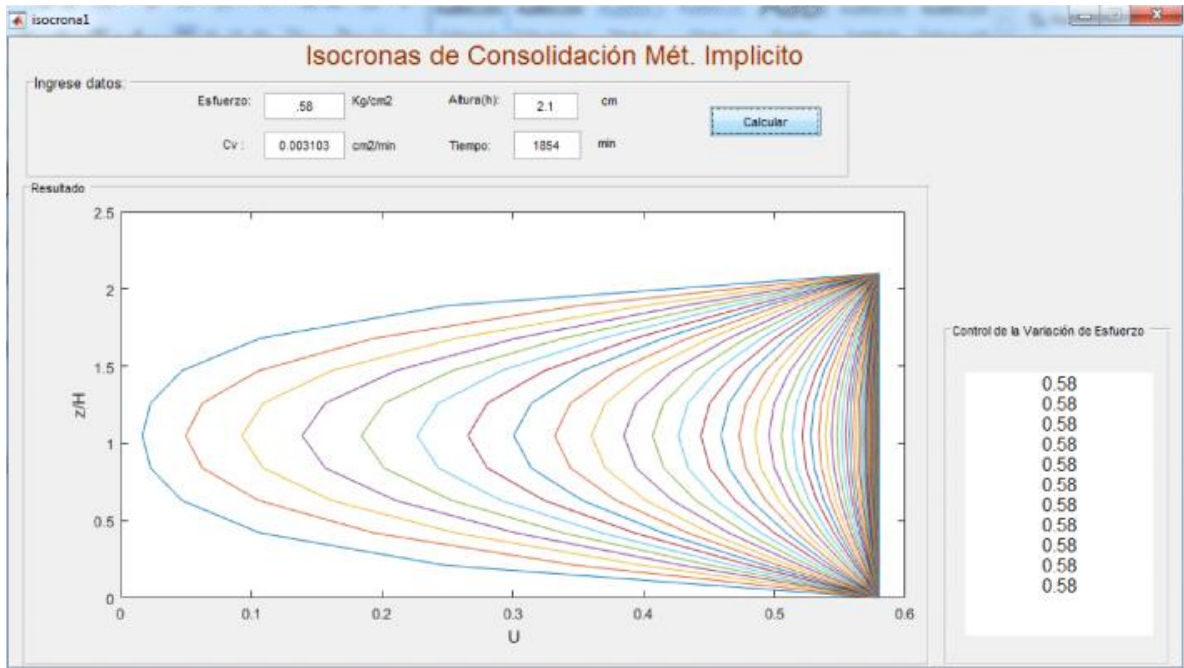


Figura 4.4: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 1854 min, método implícito Matlab R2016a.

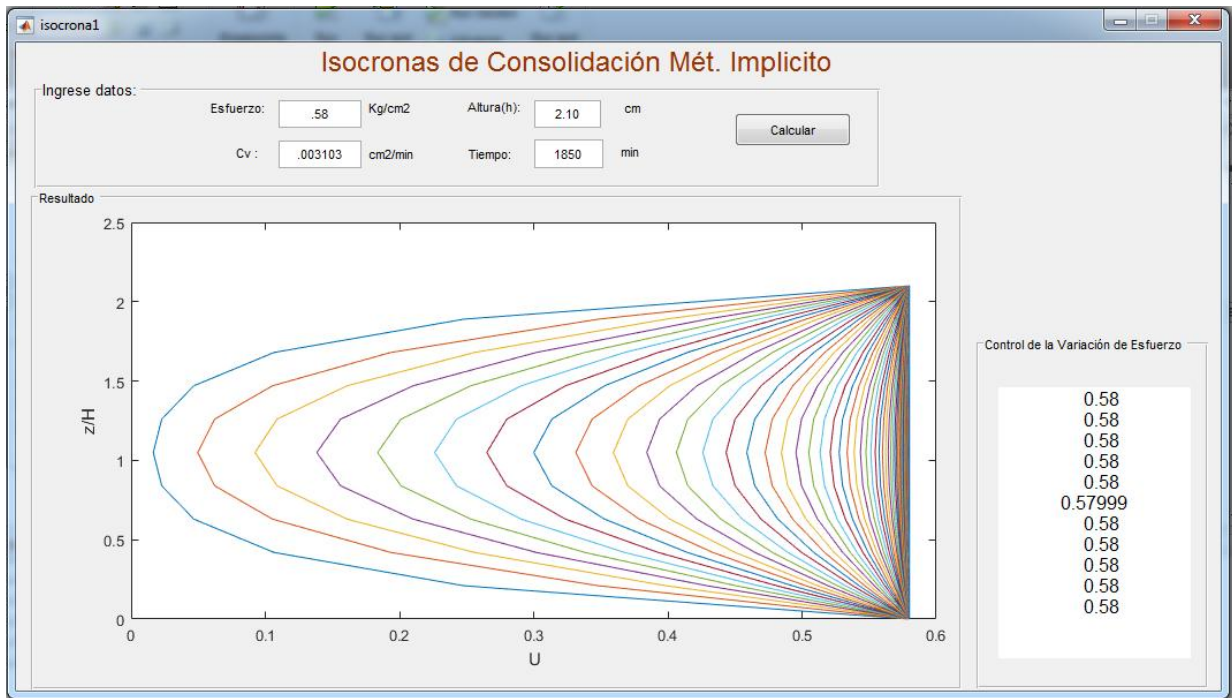


Figura 4.5: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 100 min, método Crank Nicholsón R2016a.

4.4. Resultado de las isócronas de consolidación.

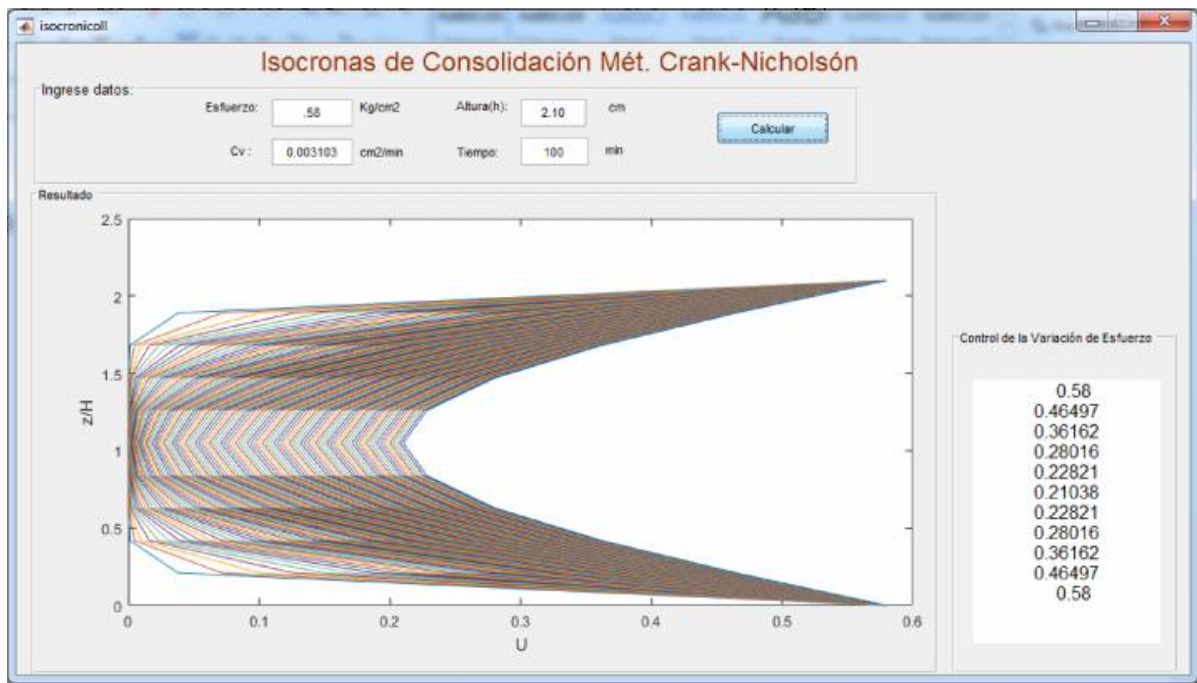


Figura 4.6: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 1000 min, método Crank Nicholsón R2016a.

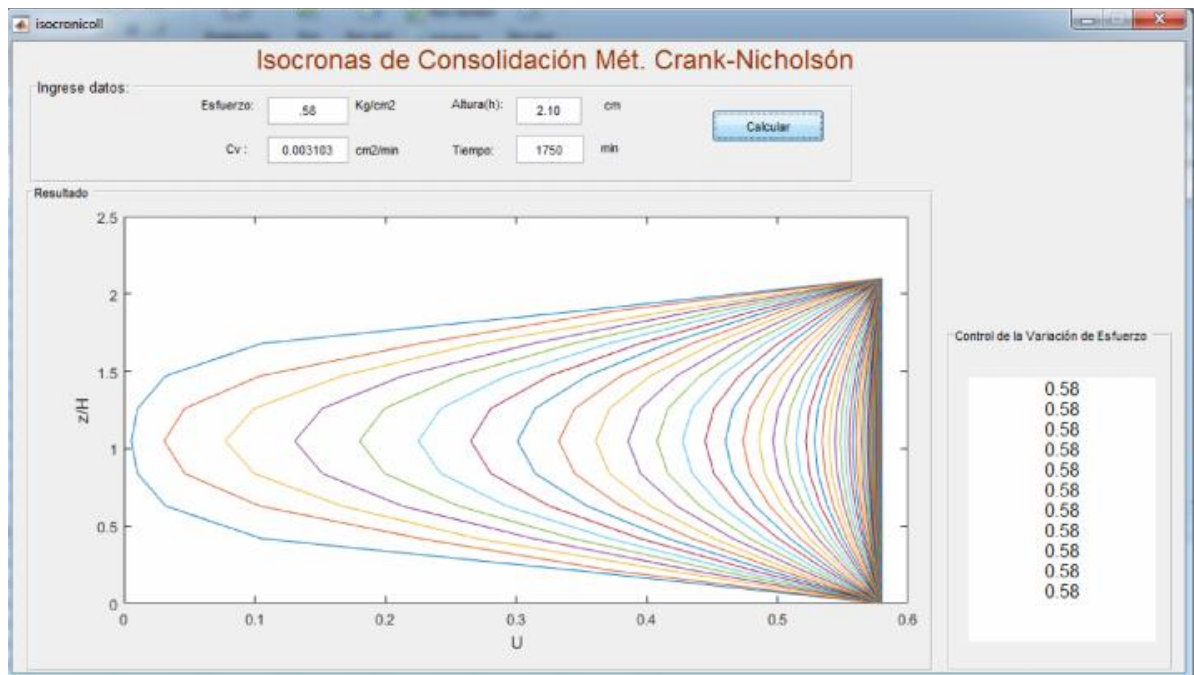


Figura 4.7: Determinación de la compresión primaria para un tiempo 1850 min, método Crank Nicholsón R2016a.

Cuadro 4.13: Valores exportados de isócronas de Matlab R2016a por método analítico.

N° Iteración	Tiempo (minutos)														
	1	5	20	25	30	35	40	45	46	50	51				
$h_i(\text{cm})$	33.61	168.04	672.16	840.20	1008.24	1176.27	1344.31	1512.35	1545.96	1680.39	1714.00				
1.050	0.00923	0.29508	0.57198	0.57756	0.57926	0.57977	0.57993	0.57998	0.57998	0.57999	0.58000				
0.945	0.00934	0.29859	0.57208	0.57759	0.57927	0.57978	0.57993	0.57998	0.57998	0.57999	0.58000				
0.840	0.00970	0.30901	0.57238	0.57768	0.57929	0.57979	0.57993	0.57998	0.57998	0.57999	0.58000				
0.735	0.01035	0.32610	0.57286	0.57783	0.57934	0.57980	0.57994	0.57998	0.57999	0.57999	0.58000				
0.630	0.01140	0.34945	0.57351	0.57803	0.57940	0.57982	0.57994	0.57998	0.57999	0.57999	0.58000				
0.525	0.01303	0.37847	0.57433	0.57828	0.57948	0.57984	0.57995	0.57999	0.57999	0.58000	0.58000				
0.420	0.01566	0.41246	0.57529	0.57857	0.57956	0.57987	0.57996	0.57999	0.57999	0.58000	0.58000				
0.315	0.02023	0.45058	0.57636	0.57889	0.57966	0.57990	0.57997	0.57999	0.57999	0.58000	0.58000				
0.210	0.02952	0.49190	0.57752	0.57925	0.57977	0.57993	0.57998	0.57999	0.57999	0.58000	0.58000				
0.105	0.05660	0.53540	0.57875	0.57962	0.57988	0.57996	0.57999	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000				
0.000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000				

Cuadro 4.14: Valores exportados de isócronas de Matlab R2016a por método implícito

N° Iteración	Tiempo (minutos)										
	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
$h_i(\text{cm})$	18.73	187.27	374.55	561.82	749.09	936.36	1123.64	1310.91	1498.18	1685.45	1854.00
0.00	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000
0.21	0.24819	0.51183	0.55954	0.57385	0.57815	0.57944	0.57983	0.57995	0.57998	0.58000	0.58000
0.42	0.10664	0.45042	0.54108	0.56830	0.57648	0.57894	0.57968	0.57990	0.57997	0.57999	0.58000
0.63	0.04683	0.40180	0.52644	0.56390	0.57516	0.57854	0.57956	0.57987	0.57996	0.57999	0.58000
0.84	0.02291	0.37066	0.51703	0.56107	0.57431	0.57829	0.57949	0.57985	0.57995	0.57999	0.58000
1.05	0.01656	0.35995	0.51379	0.56009	0.57402	0.57820	0.57946	0.57984	0.57995	0.57999	0.58000
1.26	0.02291	0.37066	0.51703	0.56107	0.57431	0.57829	0.57949	0.57985	0.57995	0.57999	0.58000
1.47	0.04683	0.40180	0.52644	0.56390	0.57516	0.57854	0.57956	0.57987	0.57996	0.57999	0.58000
1.68	0.10664	0.45042	0.54108	0.56830	0.57648	0.57894	0.57968	0.57990	0.57997	0.57999	0.58000
1.89	0.24819	0.51183	0.55954	0.57385	0.57815	0.57944	0.57983	0.57995	0.57998	0.58000	0.58000
2.10	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000

Cuadro 4.15: Valores exportados de isócronas de Matlab R2016a por método de Crank- Nicholson

N° Iteración	Tiempo (minutos)										
	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
h_i(cm)	17.68	176.77	353.54	530.30	707.07	883.84	1060.61	1237.37	1414.14	1590.91	1750.00
0.00	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000
0.21	0.34907	0.51229	0.55975	0.57394	0.57819	0.57946	0.57984	0.57995	0.57999	0.58000	0.58000
0.42	0.10511	0.45122	0.54147	0.56847	0.57655	0.57897	0.57969	0.57991	0.57997	0.57999	0.58000
0.63	0.03186	0.40274	0.52697	0.56414	0.57525	0.57858	0.57958	0.57987	0.57996	0.57999	0.58000
0.84	0.01037	0.37163	0.51766	0.56135	0.57442	0.57833	0.57950	0.57985	0.57996	0.57999	0.58000
1.05	0.00572	0.36090	0.51446	0.56039	0.57413	0.57825	0.57948	0.57984	0.57995	0.57999	0.58000
1.26	0.01037	0.37163	0.51766	0.56135	0.57442	0.57833	0.57950	0.57985	0.57996	0.57999	0.58000
1.47	0.03186	0.40274	0.52697	0.56414	0.57525	0.57858	0.57958	0.57987	0.57996	0.57999	0.58000
1.68	0.10511	0.45122	0.54147	0.56847	0.57655	0.57897	0.57969	0.57991	0.57997	0.57999	0.58000
1.89	0.34907	0.51229	0.55975	0.57394	0.57819	0.57946	0.57984	0.57995	0.57999	0.58000	0.58000
2.10	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000	0.58000

4.4. Resultado de las isócronas de consolidación.

Para el Centro Educativo de Moya se ha determinado los tiempos de consolidación con el lenguaje de programación con Matlab R2016a, con los datos obtenidos en campo y laboratorio, espesor de la arcilla es 210 cm, el coeficiente de consolidación vertical (C_v). Los tiempos son para esfuerzos efectivos de 0.59 kg/cm² y 1.17 kg/cm². Los resultados se muestran en el cuadro 4.16.

Cuadro 4.16: Tiempo de consolidación resueltos en Matlab R2016a, para 210 cm de altura

DESCRIPCION	ESFUERZO EFECTIVO 0.59 kg/cm ²		ESFUERZO EFECTIVO 1.17 kg/cm ³	
	TIEMPO (min)	FACTOR TIEMPO(T_v)	TIEMPO (min)	FACTOR TIEMPO(T_v)
	Método Analítico	17'140,000	4.82	25'000,000
Método Implícito	18'540'000	5.22	27'000,000	4.03
Método Crank-Nicholsón	17'400,000	4.90	28'000,000	4.18
Promedio	17'693,333	4.98	26'666,667	3.98

Para determinar el factor tiempo (T_v) se ha utilizado la siguiente relación.

$$T_v = \frac{C_v * t}{H^2}$$

Dónde:

t: Tiempo (min).

C_v : Coeficiente de consolidación vertical (cm²/min)

H: altura de la muestra (cm)

Para las curvas de consolidación unidimensional se obtiene del valor de isócronas de consolidación cuyo resultado se muestra en las siguientes figuras:

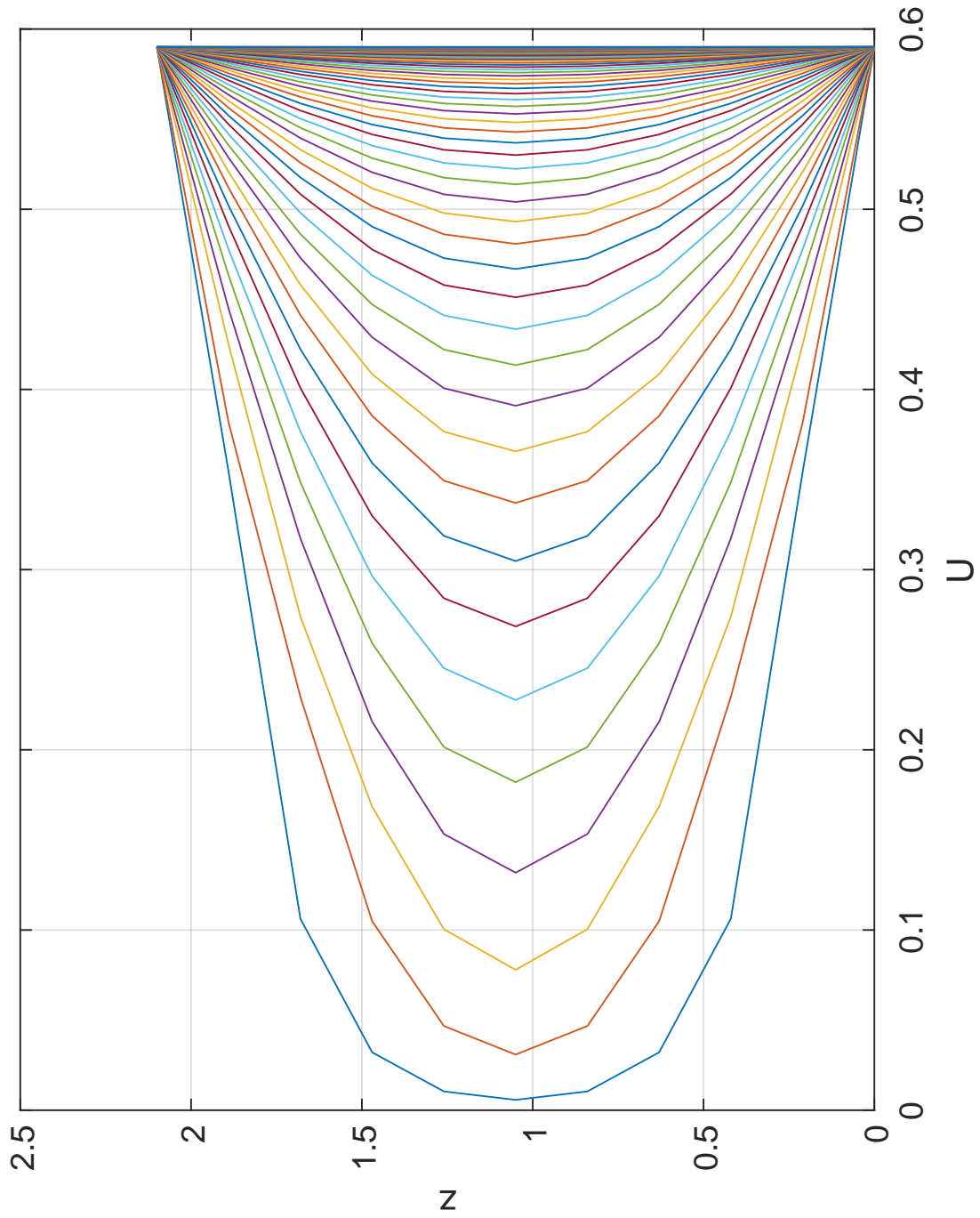


Figura 4.8: Isocronas de consolidación en Matlab R2016a para esfuerzo efectivo de 0.59 kg/cm^2 y $H=210 \text{ cm}$.

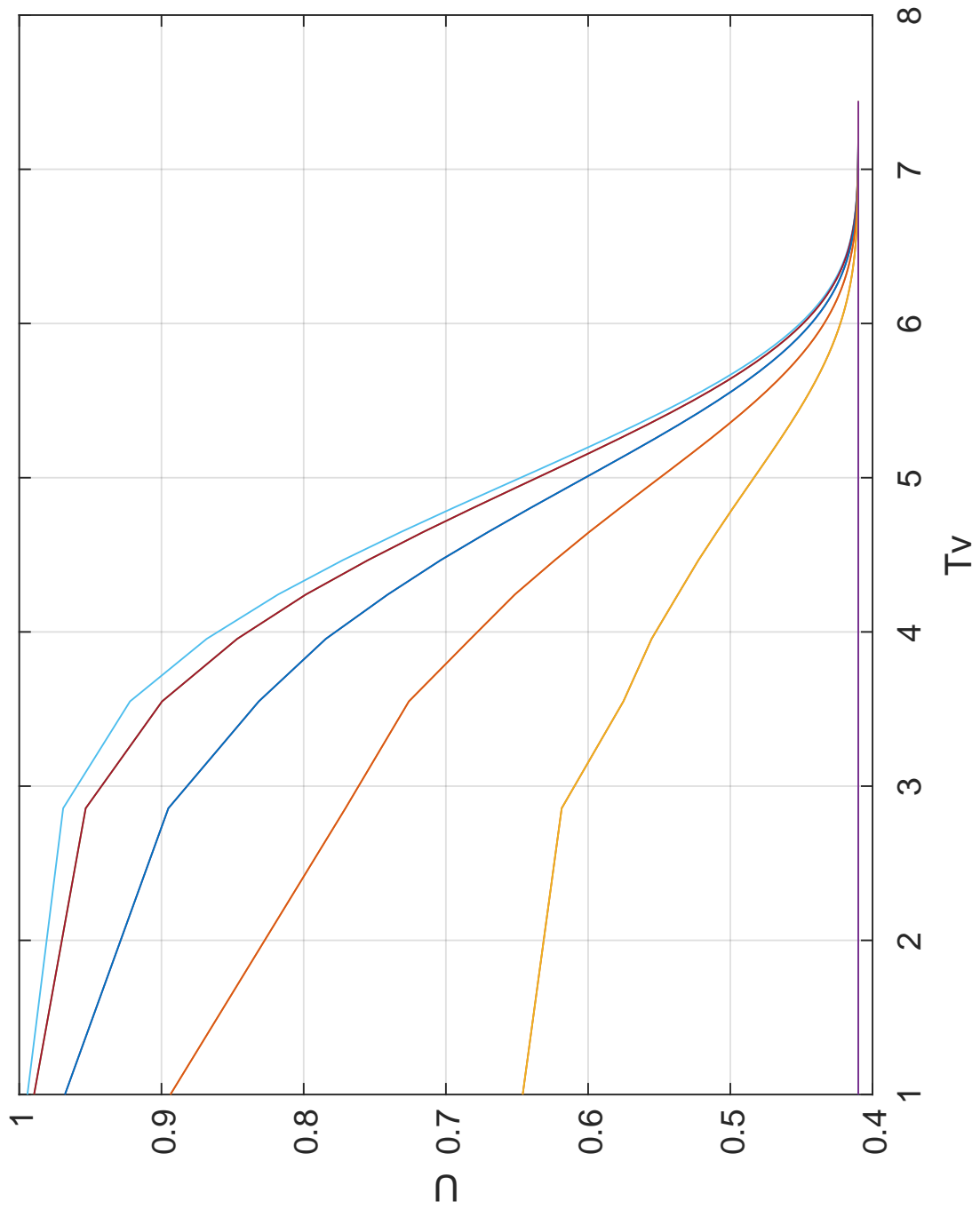


Figura 4.9: Curva de consolidación en escala semi- logarítmica.

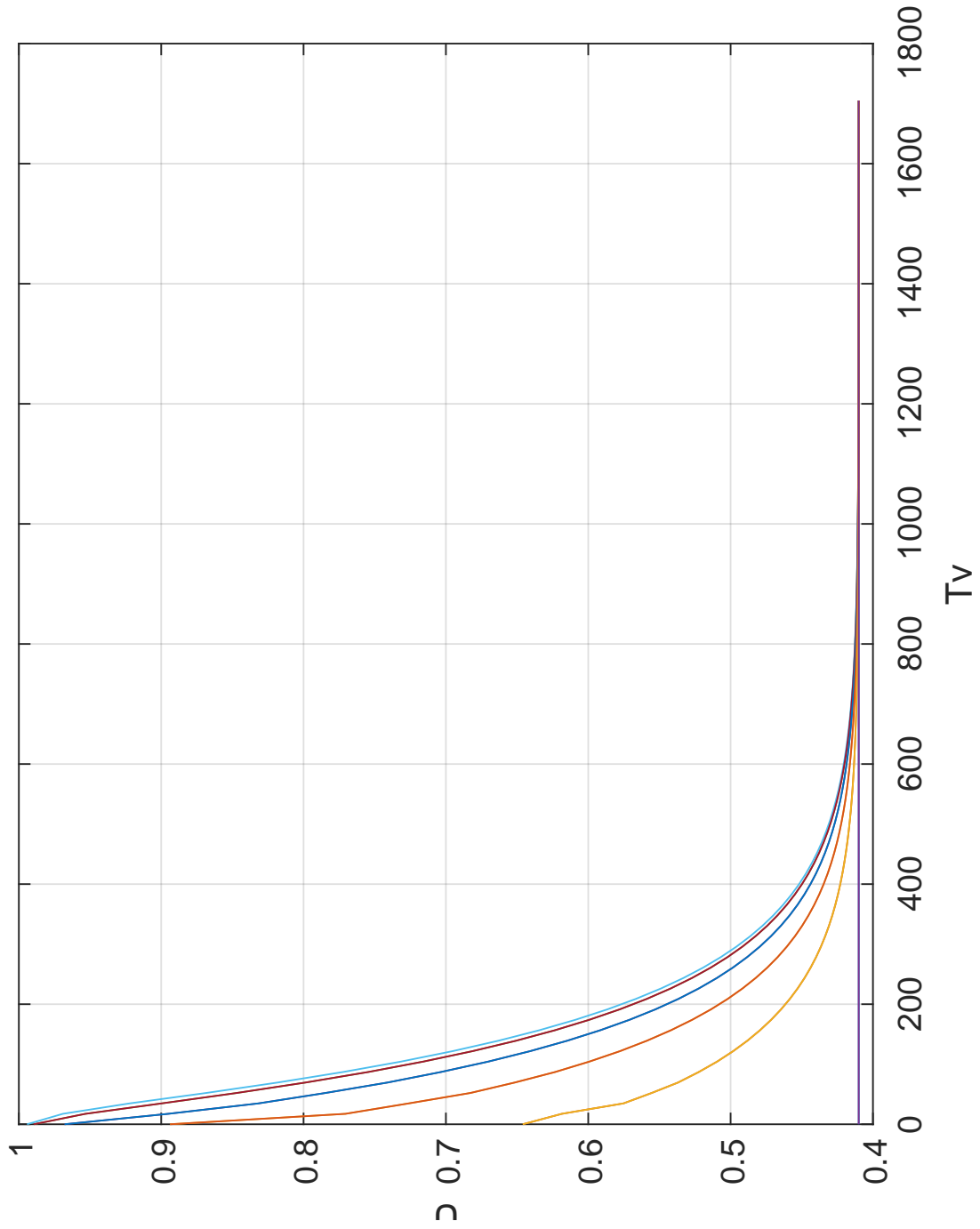


Figura 4.10: Curva de consolidación en escala aritmética.

4.4. Resultado de las isócronas de consolidación.

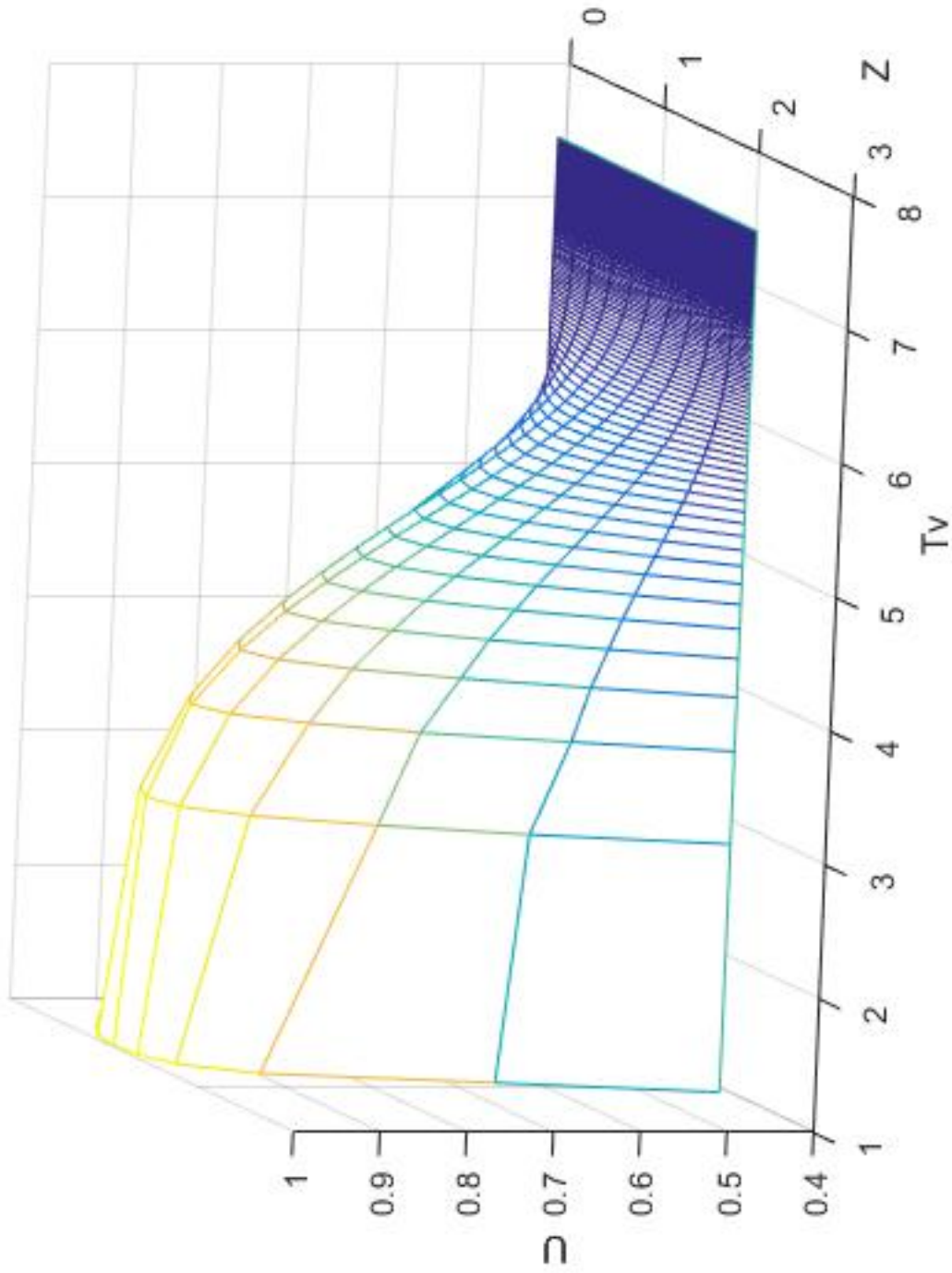


Figura 4.11: Curva de consolidación en 3D en Matlab R2016a en escala lineal

Capítulo 5

Conclusiones

Luego de realizar los ensayos, investigaciones y desarrollo de la presente tesis se concluye lo siguiente:

1. Según los ensayos realizados para la caracterización geotécnica (límite líquido, límite plástico, índice plástico, límite de contracción, gravedad específica y granulometría por sedimentación) en las arcillas del C.E. de Moya se concluye:
 - Al relacionar el promedio de límite líquido ($LL=106.78\%$) con el índice plástico ($IP=65.96\%$) en la carta de plasticidad figura 2.6, se concluye que la arcilla del C.E. de Moya es inorgánica de alta plasticidad (CH) de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 339.134.
 - Según el cuadro 2.2 presentado por Mitchell (2005), se concluye que los valores de $LL=106.78\%$ se encuentra dentro del rango 100 a 900 %, $LC=9.60\%$ dentro del rango 8.5 a 15 % y $LP=40.80\%$ se aproxima a 50 %, característico de una arcilla del tipo mortmorillonita.
 - Según el cuadro 2.3 presentado por Duque Escobar (2016), los valores obtenidos de actividad de las arcillas ($A=0.67$) se encuentra dentro del rango de 0.5 a 7.2

e índice de plasticidad ($IP=65.96\%$) mayor a 50% , se concluye que la arcilla del C.E. de Moya presenta características de las arcillas del tipo montmorillonita.

- Según el cuadro 2.52.5 presentada por Das (2013), se concluye que los resultados de la gravedad específica ($G_s=2.68\text{ gr/cm}^3$) de la arcilla de Moya, se encuentra dentro del rango 2.65 a 2.80 kg/cm^3 , característico de las arcillas del tipo montmorillonita.

Por lo señalado en los párrafos anteriores se concluye que la arcilla del C.E. de Moya es arcilla inorgánica (CH) de alta plasticidad y expansiva, que presenta la característica de una arcilla montmorillonita.

2. Los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación se resumen en el cuadro 4.12 de cuyos valores se concluye:

- Para el esfuerzo 0.59 kg/cm^2 el valor de coeficiente de consolidación vertical es $C_v=0.003103\text{ cm}^2/\text{min}$ y al aumentar los esfuerzos sobre la muestra a 1.17 kg/cm^2 disminuye a $C_v=0.001645\text{ cm}^2/\text{min}$, de dicho resultado se concluye que el coeficiente de consolidación vertical disminuye en cada incremento de esfuerzo.
- Los valores obtenidos del Coeficiente de compresibilidad volumétrica para esfuerzo 0.59 kg/cm^2 es $m_v=0.0755\text{ cm}^2/\text{kg}$, disminuye al incrementar la carga sobre la muestra a 1.17 kg/cm^2 y cuyo valor es $m_v=0.0637\text{ cm}^2/\text{kg}$, del cual se concluye que la compresibilidad de la arcilla de Moya disminuye cuando adquiere mayor resistencia a los esfuerzos ejercido sobre ella, realizando la comparación del valor m_v en el cuadro 2.8, presentado por Rodríguez Serquén (2016) se determinó que la arcilla en C.E. de Moya presenta Alta compresibilidad.

- Los valores obtenidos de permeabilidad para esfuerzo 0.59 kg/cm² es $k_v = 1.181 \times 10^{-7}$ cm²/min y para esfuerzo de 1.17 kg/cm² la permeabilidad es $k_v = 1.107 \times 10^{-7}$ cm²/min, realizando la comparación con el cuadro 2.9, presentado por Das (2013), se concluye que la muestra en estudio se encuentra dentro del rango de las arcillas, a su vez se concluye que la permeabilidad baja cuando aumenta el ciclo de esfuerzos.
- Según los resultados obtenidos de la curva $e - \log(\sigma')$, se determinó que la arcilla de moya se encuentra en un estado de sobre-consolidado, ya que el **OCR=3.25 > 1** y a su vez el esfuerzo efectivo de pre-consolidación $\sigma'_p = 0.945$ kg/cm² es mayor al esfuerzo efectivo inicial $\sigma'_0 = 0.290$ kg/cm² como se muestra en el apéndice A anexo 12.

Según los parámetros de consolidación obtenidos, se concluye que en cada incremento de carga va mejorando sus propiedades mecánicas para realizar fundaciones sobre la arcilla de Moya, previo tratamiento del suelo por consolidación.

3. Para un estrato de arcilla de 210 cm de altura y los valores obtenidos del coeficiente de consolidación vertical (C_v) del resultado de ensayo en laboratorio, se concluye que el C_v influye en la duración del proceso de consolidación como se muestra en el cuadro 4.16, el tiempo que dura la consolidación es 17'693,333 min para coeficiente de consolidación vertical es $C_v = 0.003103$ cm²/min (esfuerzo de 0.59 kg/cm²), a relación de lo que demora para $C_v = 0.001645$ cm²/min (esfuerzo de 1.17 kg/cm²), cuyo valor es 26'666,667 min y a su vez permiten graficar las isócronas de consolidación, ya que el coeficiente de consolidación vertical (C_v) cumplen la función de conductor de esfuerzos en todo el estrato de la arcilla.
4. Las gráficas de isócronas de consolidación unidimensional (1D) mostrado en la figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, realizadas en el lenguaje de programación Matlab R2016a permiten visualizar la distribución de los esfuerzos efectivos y la disipación

de las presiones de poros frente al esfuerzo total, del exterior al plano medio del estrato en función al tiempo y también permite determinar el tiempo de consolidación primaria cuyos valores se muestran en la tabla 4.16.

5. Las isócronas de consolidación está en función a los valores de esfuerzo efectivo, tiempo y altura, por medio de ellas se puede determinar el factor de tiempo, factor de altura y el grado de consolidación. Por ende se ha determinado la curva de consolidación en escala aritmética y semi logarítmica como se muestra en las figuras 4.9,4.10 y 4.11, ya que la curva de consolidación está en función al tiempo y grado de consolidación que es parte de las isócronas de consolidación.
6. Los asentamientos en la arcilla del C.E de Moya, para esfuerzo 0.59 kg/cm^2 es $S=2.008 \text{ cm}$ es muy cercana a los asentamientos máximos permisibles de 2.50 cm según el Reglamento Nacional de Edificaciones. Para esfuerzos de 1.17 kg/cm^2 el asentamiento que experimenta es $S=8.486 \text{ cm}$ que esta fuera del valor permisible por el RNE. De los resultados de asentamientos se concluye que la arcilla de Moya experimenta deformaciones que afectarían la estructura fundada sobre ella y experimentar asentamientos diferenciados.

Capítulo 6

Recomendaciones

1. Para la caracterización geotécnica se recomienda cuidado en el almacenamiento y transporte de las muestras para evitar las alteraciones de sus propiedades y difiera a los valores de campo y realizar varios ensayos a la muestra para tener mejores resultados.
2. Es muy importante recoger las muestras inalteradas e impermeabilizar para evitar las pérdidas de la humedad natural y sus propiedades.
3. Se recomienda que con este tipo de material es mejor trabajar con muestras inalteradas para evitar y alterar sus propiedades.
4. Llevar el registro de datos de los primeros asentamientos adecuadamente, ya que dependerá de ello los resultados.
5. Para determinar los parámetros de consolidación es necesario identificar la parábola y parte lineal para realizar los trazos respectivos.
6. Tener cuidado en las unidades, preferentemente se tiene que uniformizar a un solo sistema métrica, para evitar errores de cálculo.

7. Los ajustes de las curvas es primordial para obtener buenos resultados durante la determinación de los parámetros de consolidación, para evitar las desviaciones de los valores que se encuentra In situ.
8. Los ajustes de las curvas es primordial para obtener buenos resultados durante la determinación de los parámetros de consolidación, para evitar las desviaciones de los valores que se encuentra In situ.
9. Para obtener mejores resultados por método de diferencias finitas los intervalos de tiempo y altura debe ser pequeñas cercanas a cero, pero requiere mayor número de iteraciones para llegar a los resultados.
10. Para evitar los asentamientos diferenciados mecanismos (gatas y placas metálicas) que eleven la cimentación de la estructura hasta el nivel de referencia.
11. Es fundamental realizar ensayos de consolidación para los suelo suelos arcillosos, ya que permiten predecir los asentamientos y tomar medidas de correcciones frente a los posibles fallas estructurales y arquitectónico.

Bibliografía

- Berry, Peter L. & Reid, D. (1993). *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill.
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. McGraw-Hill.
- Chapra, Steven C. & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill.
- Das, B. M. (2001). Principios de ingeniería de cimentaciones. *Ed. Thomson SA México*.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning Editores S.A. de C.V.
- De Pablo Galán, L. (1964). Las arcillas: Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, pages 49–91.
- Duque Escobar, Gonzalo & Escobar Potes, C. E. (2016). *Geomecánica*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Eulalio, Juárez B. & Rodríguez, A. R. (2005). *Mecánica de suelos v. 1*. Limusa.
- Lambe, T William & Whitman, R. V. (1972). *Mecánica de suelos*. Centro Regional de Ayuda Técnica.
- Mitchell, James K. & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. Jhon Wiley & Sons, Inc., third edition edition.

Rodríguez Serquén, W. (2016). *Ingeniería geotécnica*.

Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils*. Oxford university press.

Terzaghi, K. & Peck, R. (1973). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. El Ateneo.

Tomás, R & Cuenca, A. & D. J. & D. C. and Mira, A. (2010). Cálculo analítico de la presión de preconsolidación del suelo: aplicación a la vega baja del río segura (alicante). *Ingeniería Civil*.

Whitlow, R. (1976). *Fundamentos de Mecánica de Suelos*. Compañía Editorial Continental.

Apéndice A

Resultados en Hojas de cálculo Excel

En este apéndice se adjuntan los siguientes reportes:

1. Granulometría de la Arcilla de Moya.
2. Límite líquido y Plástico.
3. Clasificación de la Arcilla de Moya.
4. Gravedad específica.
5. Datos del resultado de ensayo en consolidómetro.
6. Determinación de los parámetros de consolidación.

ANEXO 01

HUMEDAD Y GRANULOMETRIA POR TAMIZADO

Norma : NTP 339.128 (ASTM D-422) Y NTP 339.127
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Explor. : CIMENTACION **Ensayo** : 01
Ubic. : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

PESO RECIPIENTE	169.1 gr	PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA (LAV.)	169.52 gr
PESO RECIPIENTE + MUEST. CON HUMEDAD	662.63 gr	PESO DE MUEST. SECA (LAVADA.)	0.42 gr
PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA	525.2 gr	PESO DE MUEST. SECA (SIN LAVAR)	356.1 gr
CONTENIDO HUMEDAD	38.59 %		

MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PARCIAL RETENIDO (%)	RETENIDO (acumulado) (%)	PASANTE (acumulado) (%)
3"	75.000	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.000	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00
N°10	2.000	0.00	0.00	0.00	100.00
N°20	0.850	0.00	0.00	0.00	100.00
N°30	0.600	0.01	0.00	0.00	100.00
N°40	0.425	0.04	0.01	0.01	99.99
N°60	0.250	0.08	0.02	0.04	99.96
N°100	0.150	0.12	0.03	0.07	99.93
N°200	0.075	0.17	0.05	0.12	99.88
FONDO		355.68	99.88	100.00	0.00
TOTAL		356.10			

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA	
% FINOS:	99.88
% ARENA:	0.12
% GRAVA:	0.00

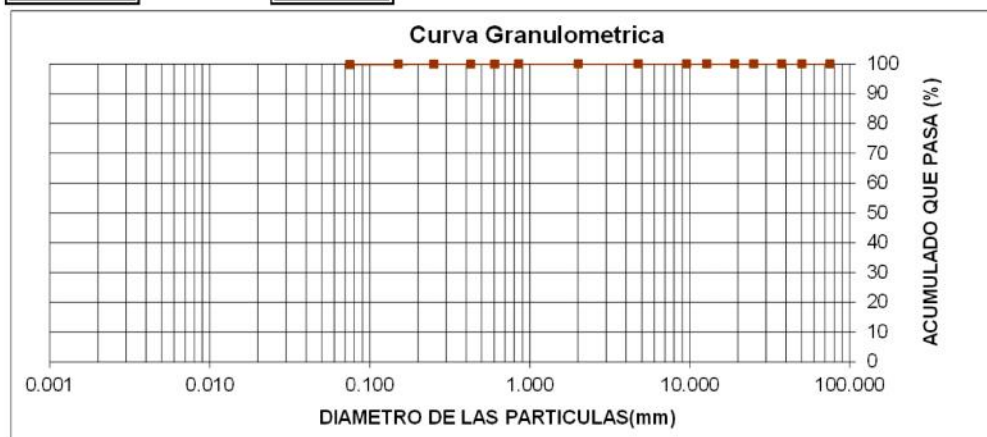


Figura A.1: Granulometría de Arcilla de Moya

ANEXO 01

HUMEDAD Y GRANULOMETRIA POR TAMIZADO

Norma : NTP 339.128 (ASTM D-422) Y NTP 339.127
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Explor. : CIMENTACION **Ensayo** : 02
Ubic. : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

PESO RECIPIENTE	168.85 gr	PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA (LAV.)	168.91 gr
PESO RECIPIENTE + MUEST. CON HUMEDAD	657.94 gr	PESO DE MUEST. SECA (LAVADA.)	0.06 gr
PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA	535.67 gr	PESO DE MUEST. SECA (SIN LAVAR)	366.82 gr
CONTENIDO HUMEDAD	33.33 %		

MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PARCIAL RETENIDO (%)	RETENIDO (acumulado) (%)	PASANTE (acumulado) (%)
3"	75.000	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.000	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº10	2.000	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº20	0.850	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº30	0.600	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº40	0.425	0.01	0.00	0.00	100.00
Nº60	0.250	0.02	0.01	0.01	99.99
Nº100	0.150	0.00	0.00	0.01	99.99
Nº200	0.075	0.03	0.01	0.02	99.98
FONDO		366.76	102.99	103.01	-3.01
TOTAL		366.82			

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA	
% FINOS:	99.98
% ARENA:	0.02
% GRAVA:	0.00

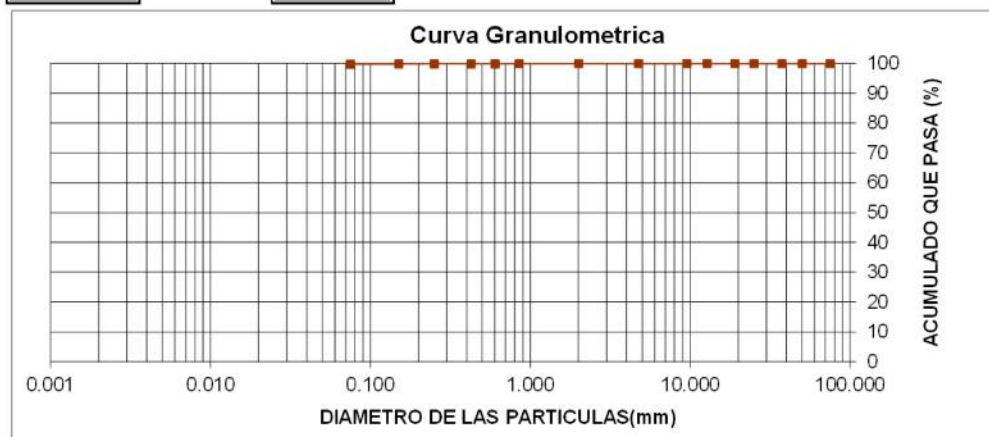


Figura A.2: Granulometría de Arcilla de Moya

ANEXO 01

HUMEDAD Y GRANULOMETRIA POR TAMIZADO

Norma : NTP 339.128 (ASTM D-422) Y NTP 339.127
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Explor. : CIMENTACION **Ensayo** : 03
Ubic. : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

PESO RECIPIENTE	164.32 gr	PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA (LAV.)	164.77 gr
PESO RECIPIENTE + MUEST. CON HUMEDAD	625.58 gr	PESO DE MUEST. SECA (LAVADA.)	0.45 gr
PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA	500.01 gr	PESO DE MUEST. SECA (SIN LAVAR)	335.69 gr
CONTENIDO HUMEDAD	37.41 %		

MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PARCIAL RETENIDO (%)	RETENIDO (acumulado) (%)	PASANTE (acumulado) (%)
3"	75.000	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.000	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00
N°10	2.000	0.00	0.00	0.00	100.00
N°20	0.850	0.00	0.00	0.00	100.00
N°30	0.600	0.04	0.01	0.01	99.99
N°40	0.425	0.02	0.01	0.02	99.98
N°60	0.250	0.15	0.04	0.06	99.94
N°100	0.150	0.10	0.03	0.09	99.91
N°200	0.075	0.14	0.04	0.13	99.87
FONDO		335.24	94.14	94.27	5.73
TOTAL		335.69			

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA	
% FINOS:	99.87
% ARENA:	0.13
% GRAVA:	0.00

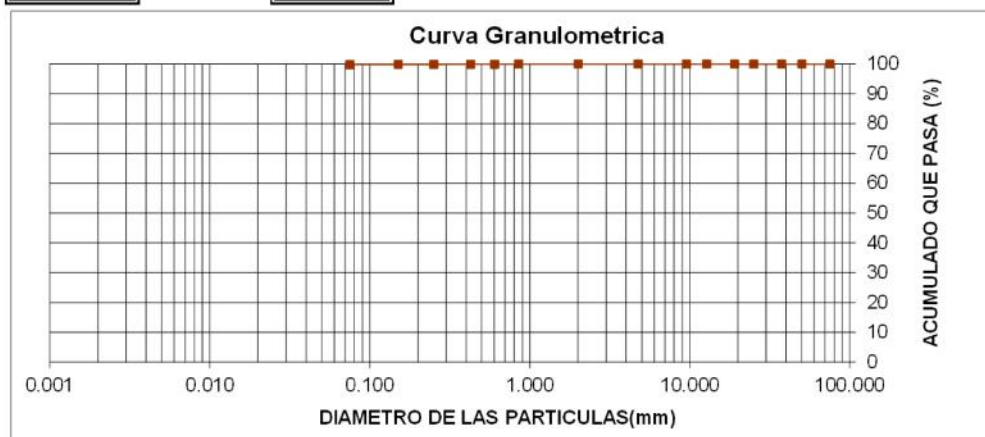


Figura A.3: Granulometría de Arcilla de Moya

ANEXO 01

HUMEDAD Y GRANULOMETRIA POR TAMIZADO

Norma : NTP 339.128 (ASTM D-422) Y NTP 339.127
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Explor. : CIMENTACION **Ensayo** : 04
Ubic. : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

PESO RECIPIENTE	169.93 gr	PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA (LAV.)	171.89 gr
PESO RECIPIENTE + MUEST. CON HUMEDAD	736.59 gr	PESO DE MUEST. SECA (LAVADA.)	1.96 gr
PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA	565.08 gr	PESO DE MUEST. SECA (SIN LAVAR)	395.15 gr
CONTENIDO HUMEDAD	43.40 %		

MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PARCIAL RETENIDO (%)	RETENIDO (acumulado) (%)	PASANTE (acumulado) (%)
3"	75.000	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.000	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00
N°10	2.000	0.01	0.00	0.00	100.00
N°20	0.850	0.07	0.02	0.02	99.98
N°30	0.600	0.08	0.02	0.04	99.96
N°40	0.425	0.16	0.04	0.09	99.91
N°60	0.250	0.40	0.11	0.20	99.80
N°100	0.150	0.50	0.14	0.34	99.66
N°200	0.075	0.74	0.21	0.55	99.45
FONDO		393.19	110.42	110.97	-10.97
TOTAL		395.15			

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA	
% FINOS:	99.45
% ARENA:	0.55
% GRAVA:	0.00

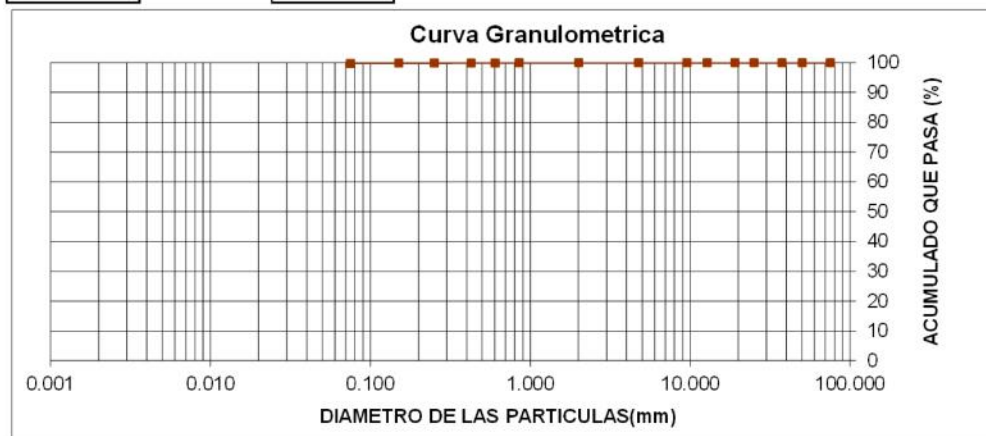


Figura A.4: Granulometría de Arcilla de Moya

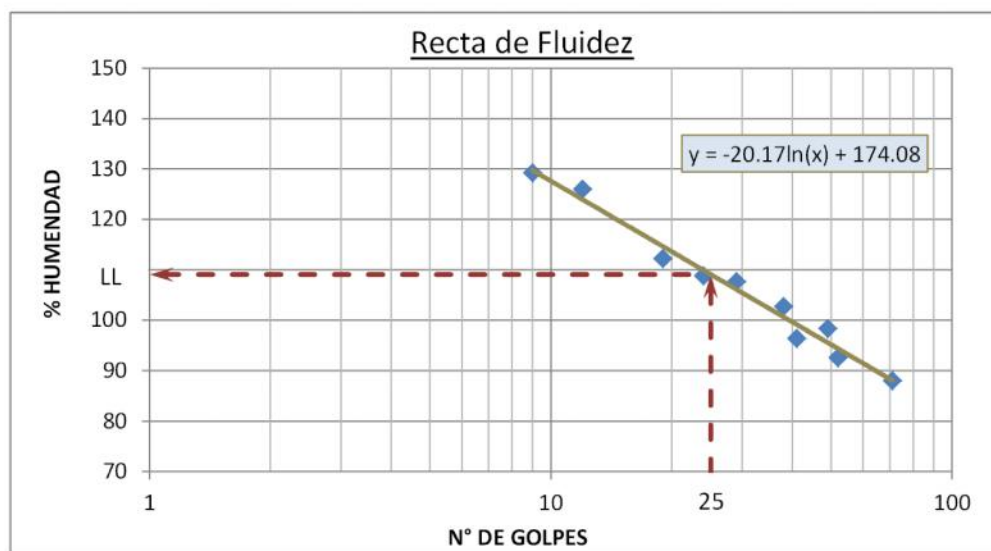
ANEXO 02

LIMITE DE ATTERBERG

Norma : NTP 339.129 (ASTM D-4318)
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Exploración : CIMENTACION **Ensayo** : 01
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

LIMITE LIQUIDO (L.L.)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nro. de Golpes	9	12	19	24	29	38	41	49	52	71
Nro. de Recip.	R-22	R-20	R-14	R-6	R-11	R-23	R-22	R-15	R-26	R-13
Wrecipiente	14.14	14.18	13.92	22.03	14	14	7.19	14.1	14.17	14.04
Wrecipiente sw	17.51	20.08	18.59	27.92	18.84	19.09	10.47	16.58	17.04	17.82
Wrecipiente s	15.61	16.79	16.12	24.85	16.33	16.51	8.86	15.35	15.66	16.05
Ww	1.9	3.29	2.47	3.07	2.51	2.58	1.61	1.23	1.38	1.77
Ws	1.47	2.61	2.2	2.82	2.33	2.51	1.67	1.25	1.49	2.01
W (%)	129.25	126.05	112.27	108.87	107.73	102.79	96.41	98.40	92.62	88.06



LIMITE PLASTICO (L.P.)

Nro. de Recip.	R-4	R-15	R-6	R-7	R-28	R-27	R-17	R-19	R-1	R-22
Wrecipiente	21.09	7.17	22.04	21.36	7.12	7.17	7.12	7.09	21.88	7.20
Wrecipiente sw	21.72	8.04	22.89	22.66	7.60	7.76	7.74	7.72	23.27	8.19
Wrecipiente s	21.54	7.79	22.64	22.29	7.46	7.59	7.56	7.54	22.88	7.91
Ww	0.18	0.25	0.25	0.37	0.14	0.17	0.18	0.18	0.39	0.28
Ws	0.45	0.62	0.60	0.93	0.34	0.42	0.44	0.45	1.00	0.71
W (%)	40.00	40.32	41.67	39.78	41.18	40.48	40.91	40.00	39.00	39.44

Límite Líquido :	Lím. Plástico	Índice de Plasticidad:
109.15 %	40.28 %	68.87 %

Figura A.5: Resultado de límite líquido y plástico de Arcilla de Moya

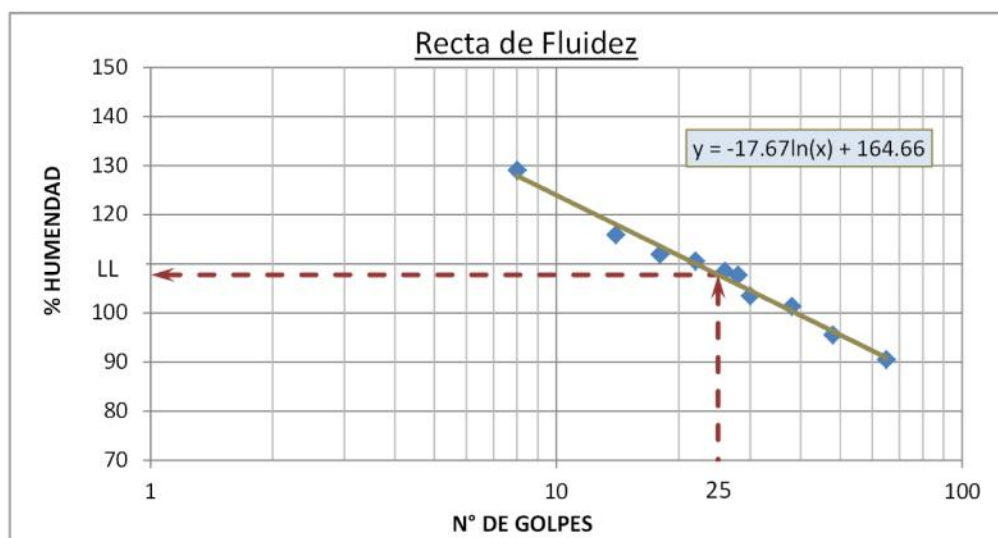
ANEXO 02

LIMITE DE ATTERBERG

Norma : NTP 339.129 (ASTM D-4318)
 Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
 Exploración : CIMENTACION Ensayo : 02
 Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

LIMITE LIQUIDO (L.L.)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nro. de Golpes	8	14	18	22	26	28	30	38	48	65
Nro. de Recip.	R-24	R-12	R-17	R-23	R-17	R-14	R-18	R-25	R-19	R-27
Wrecipiente	14.12	14.34	13.88	13.97	13.88	13.92	14.34	13.98	7.08	14
Wrecipiente sw	18.45	20.17	20.09	18.54	19.99	18.49	19.04	18.55	10.6	16.42
Wrecipiente s	16.01	17.04	16.81	16.14	16.81	16.12	16.65	16.25	8.88	15.27
Ww	2.44	3.13	3.28	2.4	3.18	2.37	2.39	2.3	1.72	1.15
Ws	1.89	2.7	2.93	2.17	2.93	2.2	2.31	2.27	1.8	1.27
W (%)	129.10	115.93	111.95	110.60	108.53	107.73	103.46	101.32	95.56	90.55



LIMITE PLASTICO (L.P.)

Nro. de Recip.	R-25	R-13	R-8	R-19	R-5	R-11	R-13	R-6	R-16	R-26
Wrecipiente	7.17	7.10	22.29	7.09	21.15	7.05	7.10	22.04	7.16	7.14
Wrecipiente sw	7.63	7.62	22.88	7.54	21.97	7.73	7.92	23.16	7.90	7.84
Wrecipiente s	7.5	7.47	22.71	7.41	21.74	7.53	7.69	22.85	7.68	7.64
Ww	0.13	0.15	0.17	0.13	0.23	0.2	0.23	0.31	0.22	0.2
Ws	0.33	0.37	0.42	0.32	0.59	0.48	0.59	0.81	0.52	0.50
W (%)	39.39	40.54	40.48	40.62	38.98	41.67	38.98	38.27	42.31	40.00

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
107.80 %	40.12 %	67.68 %

Figura A.6: Resultado de límite líquido y plástico de Arcilla de Moya

ANEXO 02

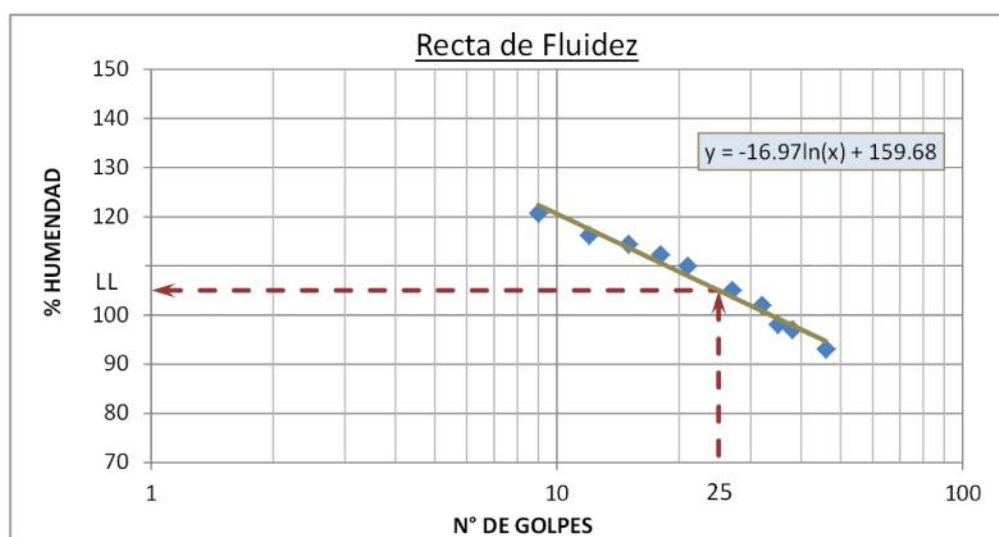
LIMITE DE ATTERBERG

Norma : NTP 339.129 (ASTM D-4318)
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Exploración : CIMENTACION **Ensayo** : 03
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

LIMITE LIQUIDO (L.L.)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nro. de Golpes	9	12	15	18	21	27	32	35	38	46
Nro. de Recip.	R-18	R-30	R-16	R-18	R-16	R-15	R-14	R-27	R-24	R-28
Wrecipiente	14.32	14.12	14.12	14.32	14.12	14.08	13.9	13.98	14.11	14.15
Wrecipiente sw	20.08	18.38	17.55	19.86	17.48	18.16	19.07	17.09	18.78	18.59
Wrecipiente s	16.93	16.09	15.72	16.93	15.72	16.07	16.46	15.55	16.48	16.45
Ww	3.15	2.29	1.83	2.93	1.76	2.09	2.61	1.54	2.3	2.14
Ws	2.61	1.97	1.6	2.61	1.6	1.99	2.56	1.57	2.37	2.3
W (%)	120.69	116.24	114.38	112.26	110.00	105.03	101.95	98.09	97.05	93.04



LIMITE PLASTICO (L.P.)

Nro. de Recip.	R-13	R-26	R-22	R-15	R-19	R-28	R-16	R-4	R-5	R-11
Wrecipiente	7.1	7.13	7.19	7.17	7.09	7.11	7.16	21.09	21.14	7.05
Wrecipiente sw	7.63	7.65	7.71	7.86	7.93	7.59	7.82	21.68	22.21	7.60
Wrecipiente s	7.48	7.50	7.56	7.66	7.69	7.45	7.63	21.51	21.90	7.44
Ww	0.15	0.15	0.15	0.2	0.24	0.14	0.19	0.17	0.31	0.16
Ws	0.38	0.37	0.37	0.49	0.60	0.34	0.47	0.42	0.76	0.39
W (%)	39.47	40.54	40.54	40.82	40.00	41.18	40.43	40.48	40.79	41.03

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
105.04 %	40.53 %	64.51 %

Figura A.7: Resultado de límite líquido y plástico de Arcilla de Moya

ANEXO 02

LIMITE DE ATTERBERG

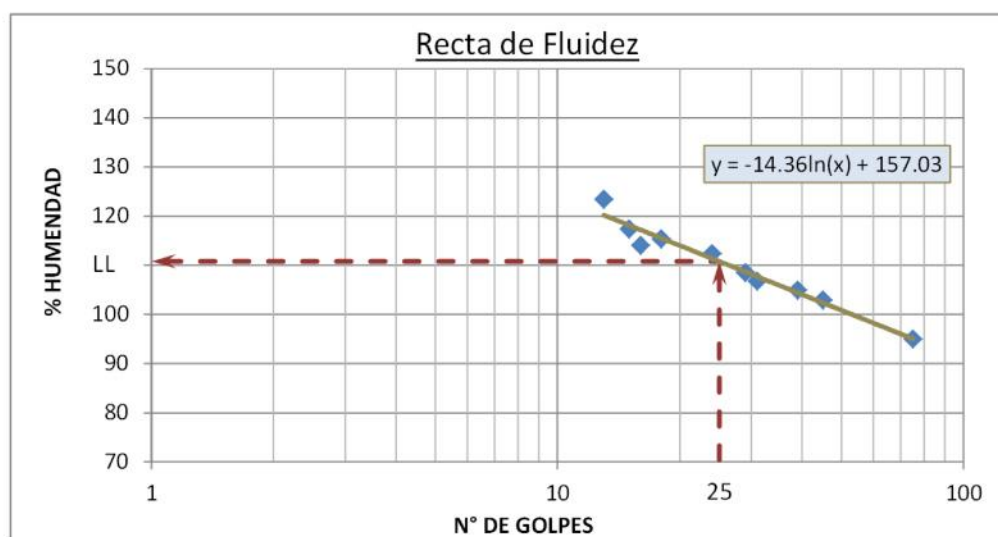
Norma : NTP 339.129 (ASTM D-4318)
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Exploración : CIMENTACION **Ensayo** : 04

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

LIMITE LIQUIDO (L.L.)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nro. de Golpes	13	29	24	18	31	45	15	39	16	75
Nro. de Recip.	R-1	R-26	R-7	R-19	R-17	R-22	R-29	R-13	R-29	R-11
Wrecipiente	21.88	14.15	21.34	14.14	13.88	14.11	14.2	14.01	14.2	13.95
Wrecipiente sw	25.79	19.78	25.97	17.78	19.05	19.65	16.83	18.15	16.79	16.68
Wrecipiente s	23.63	16.85	23.52	15.83	16.38	16.84	15.41	16.03	15.41	15.35
Ww	2.16	2.93	2.45	1.95	2.67	2.81	1.42	2.12	1.38	1.33
Ws	1.75	2.7	2.18	1.69	2.5	2.73	1.21	2.02	1.21	1.4
W (%)	123.43	108.52	112.39	115.38	106.80	102.93	117.36	104.95	114.05	95.00



LIMITE PLASTICO (L.P.)

Nro. de Recipiente	R-2	R-6	R-25	R-17	R-12	R-10	R-9	R-6	R-16	R-26
Wrecipiente	21.63	22.04	7.17	7.12	7.14	21.07	21.67	22.04	7.16	7.14
Wrecipiente sw	22.30	23.01	8.46	7.94	7.81	21.94	22.39	23.19	7.90	7.85
Wrecipiente s	22.1	22.72	8.08	7.70	7.61	21.68	22.18	22.85	7.68	7.64
Ww	0.2	0.29	0.38	0.24	0.2	0.26	0.21	0.34	0.22	0.21
Ws	0.47	0.68	0.91	0.58	0.47	0.61	0.51	0.81	0.52	0.50
W (%)	42.55	42.65	41.76	41.38	42.55	42.62	41.18	41.98	42.31	42.00

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
110.82 %	42.10 %	68.72 %

Figura A.8: Resultado de límite líquido y plástico de Arcilla de Moya

ANEXO 03

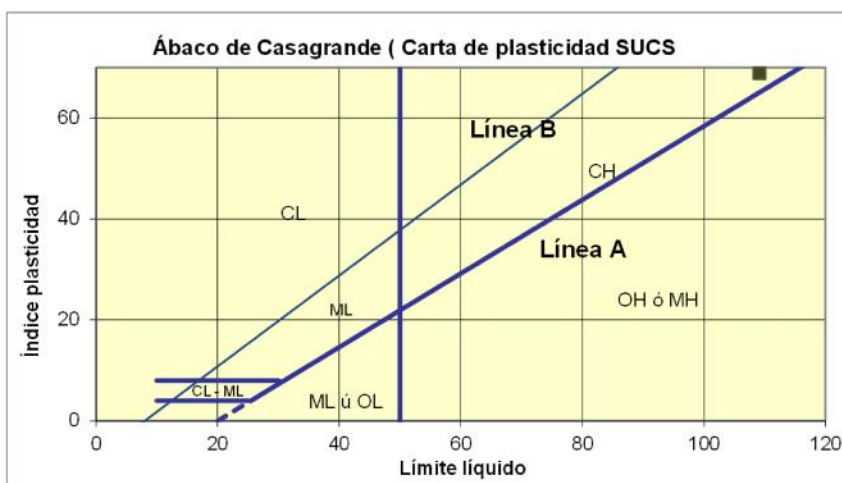
CLASIFICACION POR SUCS Y AASTHO

Norma : NTP 339.134 (ASTM D-422)
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Exploración : CIMENTACION **Ensayo** : 01
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

RESUMEN DE PROPIEDADES GEOTECNICAS (LIMITES DE ATTERBERG Y GRANULOMETRIA)

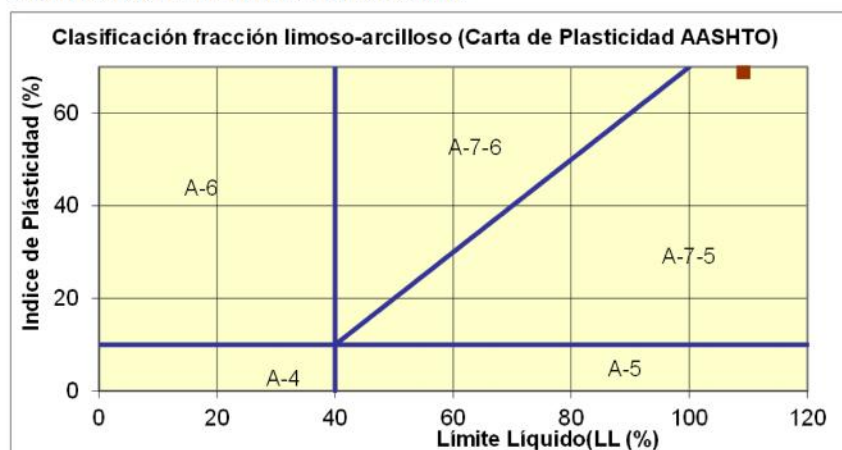
LIMITES DE CONSISTENCIA :	CARACTERISTICAS DE GRADUACION	DISTRIBUCION GRANULOMETRICA
LIMITE LIQUIDO: 109.15	D10= 0.00	% FINOS: 99.88
LIMITE PLASTICO: 40.28	D30= 0.00	% ARENA: 0.12
INDICE DE PLASTICIDAD: 68.87	D60= 0.00	% GRAVA: 0.00
INDICE DE CONTRACCIÓN: 55.00	Cu= 0.00 Cc= 0.00	CONT. HUM.: 38.59

CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- SUCS



DENOMINACION SUCS
 ARCILLAS INORGANICAS (CH)

CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- AASTHO



DENOMINACION AASTHO
 ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD (A-7-5)

NOMBRE DEL GRUPO : ARCILLA INORGANICA DE ALTA PLASTICIDAD

Figura A.9: Resultado de clasificación de Arcilla de Moya

ANEXO 03

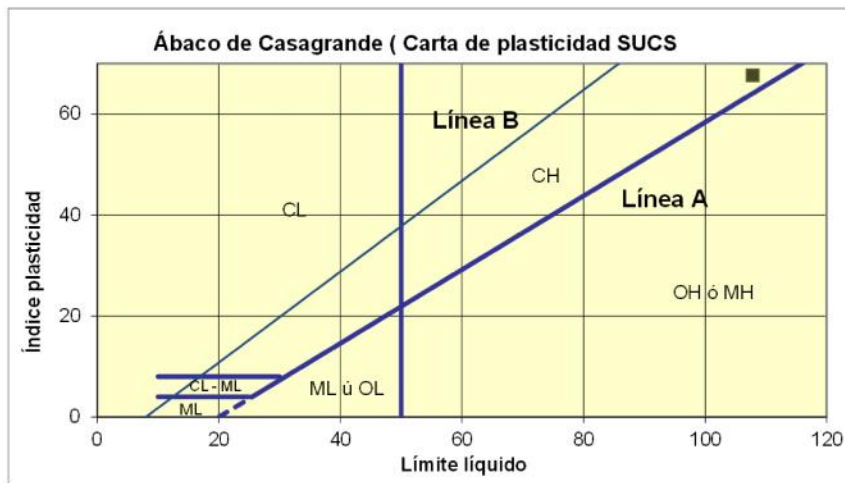
CLASIFICACION POR SUCS Y AASTHO

Norma : NTP 339.134 (ASTM D-422)
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Exploración : CIMENTACION **Ensayo** : 02
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

RESUMEN DE PROPIEDADES GEOTECNICOS (LIMITES DE ATTERBERG Y GRANULOMETRIA)

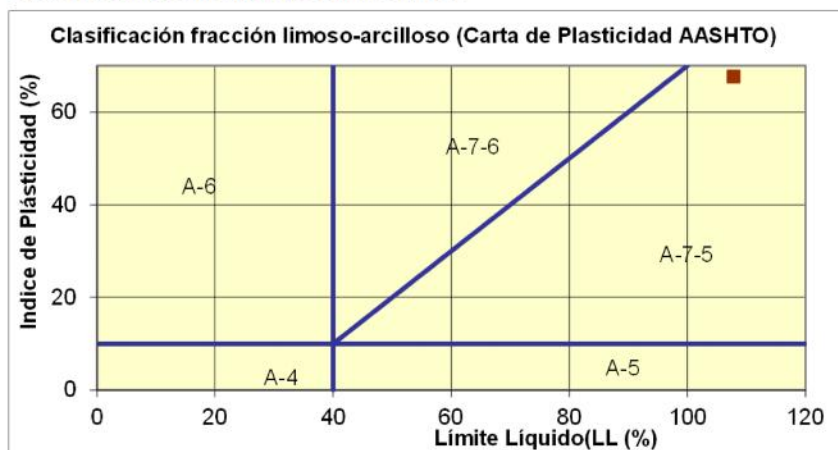
LIMITES DE CONSISTENCIA :	CARACTERISTICAS DE GRADUACION	DISTRIBUCION GRANULOMETRICA
LIMITE LIQUIDO: 107.80	D10= 0.00	% FINOS: 99.98
LIMITE PLASTICO: 40.12	D30= 0.00	% ARENA: 0.02
INDICE DE PLASTICIDAD: 67.68	D60= 0.00	% GRAVA: 0.00
INDICE DE CONTRACCIÓN: 55.00	Cu= 0.00 Cc= 0.00	CONT. HUM.: 33.33

CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- SUCS



DENOMINACION SUCS
 ARCILLAS INORGANICAS (CH)

CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- AASTHO



DENOMINACION AASTHO
 ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD (A-7-5)

NOMBRE DEL GRUPO : ARCILLA INORGANICA DE ALTA PLASTICIDAD

Figura A.10: Resultado de clasificación de Arcilla de Moya

ANEXO 03

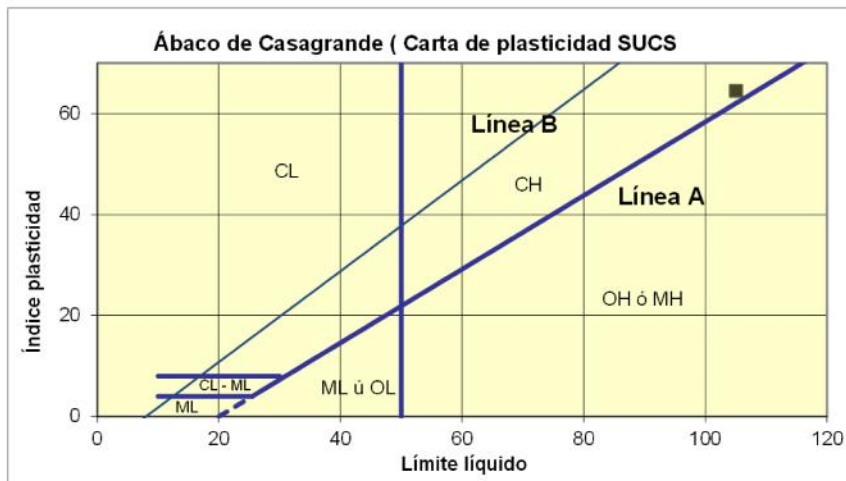
CLASIFICACION POR SUCS Y AASTHO

Norma : NTP 339.134 (ASTM D-422)
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Exploración : CIMENTACION **Ensayo** : 03
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

RESUMEN DE PROPIEDADES GEOTECNICAS (LIMITES DE ATTERBERG Y GRANULOMETRIA)

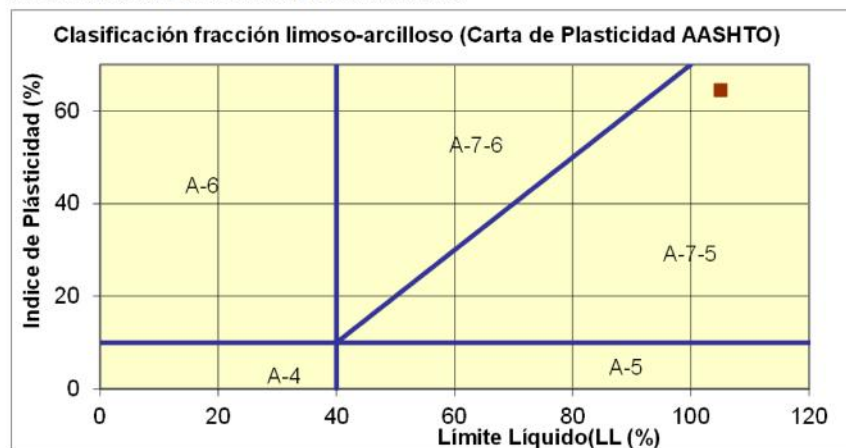
LIMITES DE CONSISTENCIA :	CARACTERISTICAS DE GRADUACION	DISTRIBUCION GRANULOMETRICA
LIMITE LIQUIDO: 105.04	D10= 0.00	% FINOS: 99.87
LIMITE PLASTICO: 40.53	D30= 0.00	% ARENA: 0.13
INDICE DE PLASTICIDAD: 64.51	D60= 0.00	% GRAVA: 0.00
INDICE DE CONTRACCIÓN: 55.00	Cu= 0.00 Cc= 0.00	CONT. HUM.: 37.41

CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- SUCS



DENOMINACION SUCS
ARCILLAS INORGANICAS (CH)

CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS-AASTHO



DENOMINACION AASTHO
ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD (A-7-5)

NOMBRE DEL GRUPO : ARCILLA INORGANICA DE ALTA PLASTICIDAD

Figura A.11: Resultado de clasificación de Arcilla de Moya

ANEXO 03

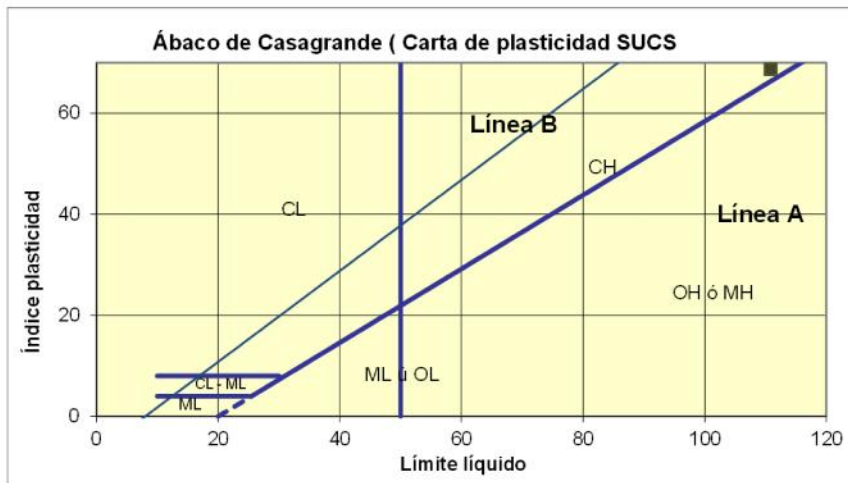
CLASIFICACION POR SUCS Y AASTHO

Norma : NTP 339.134 (ASTM D-422)
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Exploración : CIMENTACION **Ensayo** : 04
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANA-AYACUCHO

RESUMEN DE PROPIEDADES GEOTECNICOS (LÍMITES DE ATTERBERG Y GRANULOMETRIA)

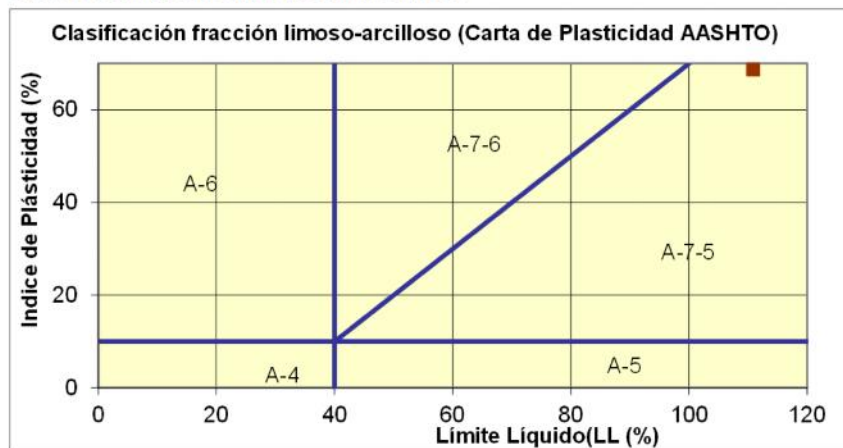
LIMITES DE CONSISTENCIA :	CARACTERISTICAS DE GRADUACION	DISTRIBUCION GRANULOMETRICA
LIMITE LIQUIDO: 110.82	D10= 0.00	% FINOS: 99.98
LIMITE PLASTICO: 42.10	D30= 0.00	% ARENA: 0.02
INDICE DE PLASTICIDAD: 68.72	D60= 0.00	% GRAVA: 0.00
INDICE DE CONTRACCIÓN: 55.00	Cu= 0.00 Cc= 0.00	% CONT. HUM.: 33.33

CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- SUCS



DENOMINACION SUCS
 ARCILLAS INORGANICAS (CH)

CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- AASTHO



DENOMINACION AASTHO
 ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD (A-7-5)

NOMBRE DEL GRUPO : ARCILLA INORGANICA DE ALTA PLASTICIDAD

Figura A.12: Resultado de clasificación de Arcilla de Moya

ANEXO 04

GRAVEDAD ESPECIFICA POR EL METODO DEL PICNOMETRO

Norma : NTP 339.131 (ASTM D 854)
Tema : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Exploración : CIMENTACION
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

N°	MUESTRA	1	2	3	4
	N° de recipiente	T-8	T-32	T-2	T-49
1	Wpicnometro(gr)	223.45	223.45	223.45	223.45
2	Wrecipiente (gr)	163.31	166.87	163.38	172.37
3	Wsuelo (gr)	100.09	123.48	120.15	123.02
4	Wrecipiente+ suelo sec. (gr)	259.72	304.25	277.56	306.35
5	Wpignometro+Agua Dest + suelo (gr)	780.35	802.14	791.17	802.67
6	Wpignometro+Agua Calib. (gr)	719.80	717.21	719.80	717.21
Gravedad Especifica (gr/cm3)		2.69	2.62	2.67	2.76
Gravedad Especifica Promedio (Gs)		2.68 gr/cm3			

* Se ha determinado la gravedad especifico realizando la siguiente operación:

$$G_s = \frac{[(4) - (2)]}{\{[(6) - (1)] - [(5) - (4) + (2) - (1)]\}}$$

y el promedio resulta de la sumatoria de los ensayos entre el numero de la cantidad de ensayos.



Figura A.13: Gravedad específica de la Arcilla de Moya.

ANEXO 05

LECTURAS OBTENIDOS DEL CONSOLIDOMETRO

Norma : NTP 339.154
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO **Ensayo** : 02

DIMENSIONES DEL ANILLO		
Altura :	2.10	cm
Diámetro:	6.59	cm
Área :	34.11	cm ²

DIMENSIONES DE LA MUESTRA		
	INICIAL	FINAL
Peso del Anillo (gr.)	72	
W.Anillo + Muestra (gr.)	190.23	165.3

TIEMPO Minutos	LECTURA (Pulg.)						
	20Kg	40Kg	80Kg	160Kg	320Kg	640Kg	1280Kg
	0.58Kg/cm2	1.17Kg/cm2	2.34Kg/cm2	4.69Kg/cm2	9.38Kg/cm2	18.76Kg/cm2	37.52Kg/cm2
0.10	0.0416	0.0589	0.0891	0.1298	0.1690	0.2089	0.2475
0.25	0.0418	0.0660	0.0992	0.1329	0.1791	0.2093	0.2486
0.50	0.0420	0.0661	0.0993	0.1329	0.1792	0.2109	0.2502
1.0	0.0421	0.0671	0.0994	0.1335	0.1802	0.2110	0.2504
2.0	0.0423	0.0672	0.0995	0.1343	0.1804	0.2112	0.2505
4.0	0.0429	0.0676	0.0996	0.1350	0.1805	0.2122	0.2509
8.0	0.0435	0.0681	0.0997	0.1360	0.1808	0.2134	0.2513
15.0	0.0441	0.0691	0.1001	0.1375	0.1812	0.2145	0.2515
30.0	0.0450	0.0699	0.1018	0.1390	0.1822	0.2159	0.2529
60.0	0.0465	0.0710	0.1051	0.1417	0.1847	0.2188	0.2572
120.0	0.0485	0.0736	0.1090	0.1455	0.1867	0.2230	0.2592
240.0	0.0509	0.0772	0.1155	0.1505	0.1917	0.2272	0.2659
480.0	0.0538	0.0815	0.1211	0.1570	0.1977	0.2368	0.2712
720.0	0.0562	0.0856	0.1251	0.1635	0.2027	0.2408	0.2759
1140.0	0.0572	0.0876	0.1274	0.1657	0.2057	0.2428	0.2784
1440.0	0.0581	0.0882	0.1281	0.1663	0.2067	0.2448	0.2799
2880.0	0.0584	0.0886	0.1287	0.1670	0.2076	0.2461	0.2809
4320.0	0.0587	0.0889	0.1294	0.1680	0.2085	0.2468	0.2819
Δh	0.0173	0.0302	0.0407	0.0392	0.0399	0.0386	0.0349

HUMEDAD Y PESO ESPECIFICO			
PRUEBA		INICIO	FINAL
peso Muestra Hum +Anillo (gr.)		190.23	165.30
peso muestra Seca +Anillo (gr.)		144.92	144.92
peso del anillo (gr.)		72.00	72.00
Peso muestra seca (gr)		72.92	72.92
Volumen de la muestra (cm3)		71.63	47.16
Humedad. (%)		62.14	27.95
Peso específico (gr/cm3)		1.02	1.55

Figura A.14: Registro de datos del consolidómetro ensayo 02.

ANEXO 05

LECTURAS OBTENIDOS DEL CONSOLIDOMETRO

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

Ensayo : 02

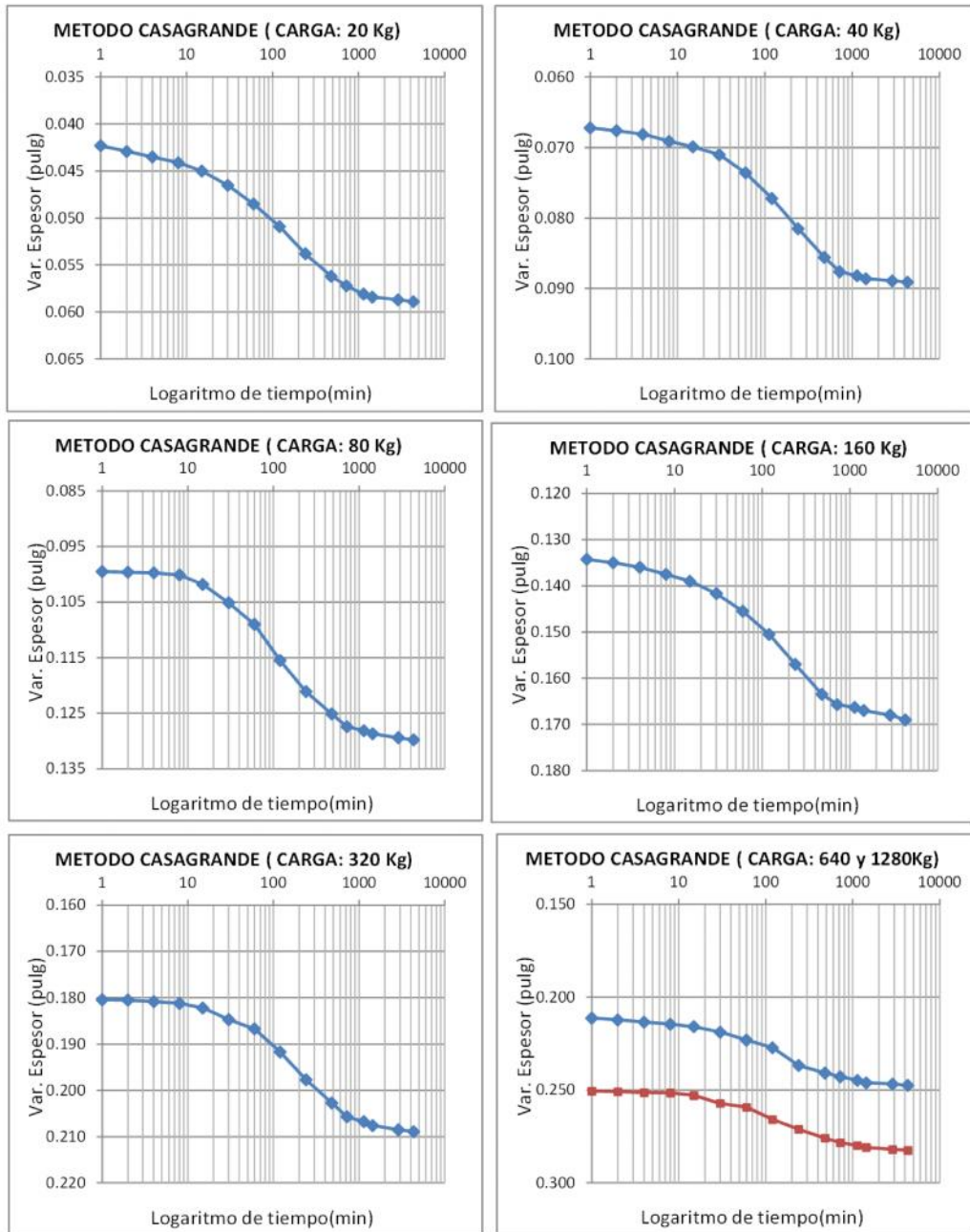


Figura A.15: Gráfica de los datos por logaritmo de tiempo ensayo 02.

ANEXO 06

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE VERTICAL DE CONSOLIDACION

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

Ensayo : 02

Carga: 0.58kg/cm2

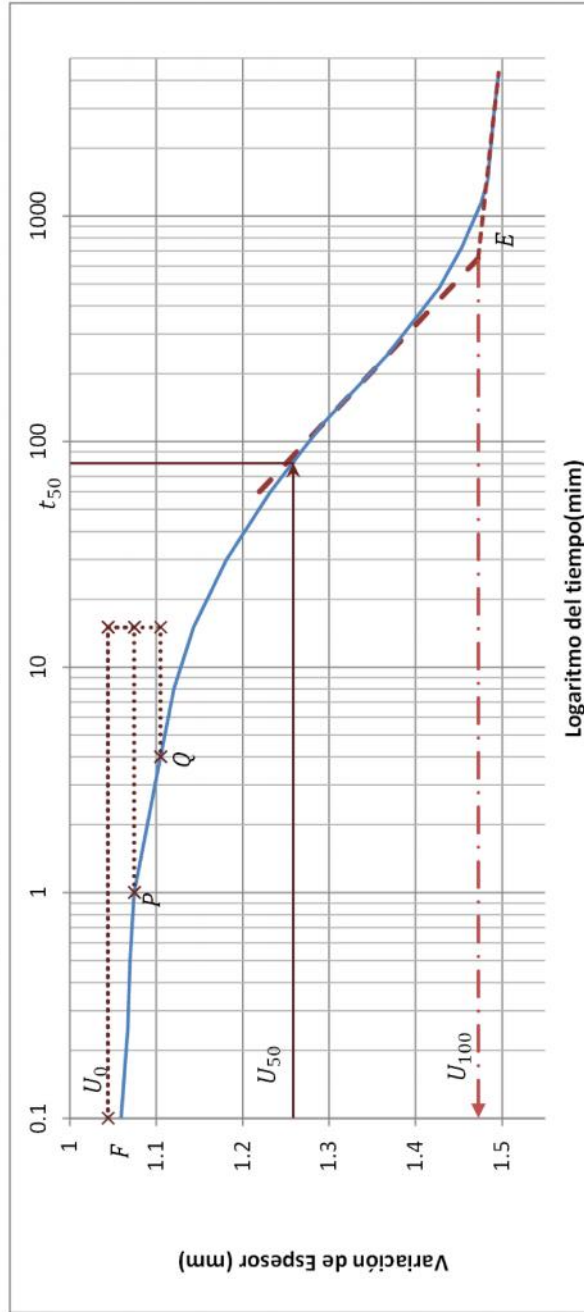
Diametro del anillo	6.59 cm
---------------------	---------

Altura del anillo	h 2.1 cm
-------------------	----------

t_p	1 min
t_q	4 min

Parte lineal	Inicio 120 min	Final 240 min
--------------	----------------	---------------

Tiempo (min)	Esesor (pulg)	Esesor (mm)
0.1	0.0417	1.0592
0.25	0.0420	1.0668
0.5	0.0421	1.0693
1	0.0423	1.0744
2	0.0429	1.0897
4	0.0435	1.1049
8	0.0441	1.1201
15	0.0450	1.1430
30	0.0465	1.1811
60	0.0485	1.2319
120	0.0509	1.2929
240	0.0538	1.3665
480	0.0562	1.4275
720	0.0572	1.4529
1140	0.0581	1.4757
1440	0.0584	1.4834
2880	0.0587	1.4910
4320	0.0589	1.4961



De la gráfica = para: $\Delta h_o = \Delta h_p - (\Delta h_q - \Delta h_p) =$ de la gráfica: $\Delta h_{100} = 1.4723$
 $t_p = 1 \text{ min}$ $\Delta h_p = 1.07442$
 $t_q = 4.00 \text{ min}$ $\Delta h_q = 1.10490$ $\Delta h_F = \Delta h_o = 1.04394$ $\Delta h_{50} = \Delta h_o - \frac{(\Delta h_{100} - \Delta h_o)}{2} = 1.2581$
 $d = 1.05 \text{ cm}$
 $C_v = 0.002715 \text{ cm}^2/\text{min}$ $t_{50} = 80.00$

Figura A.16: Resultado de coeficiente de consolidación vertical (Cv) ensayo 02

ANEXO 07

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE VERTICAL DE CONSOLIDACION

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACIÓN DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

Carga: 1.17Kg/cm2

Ensayo : 02

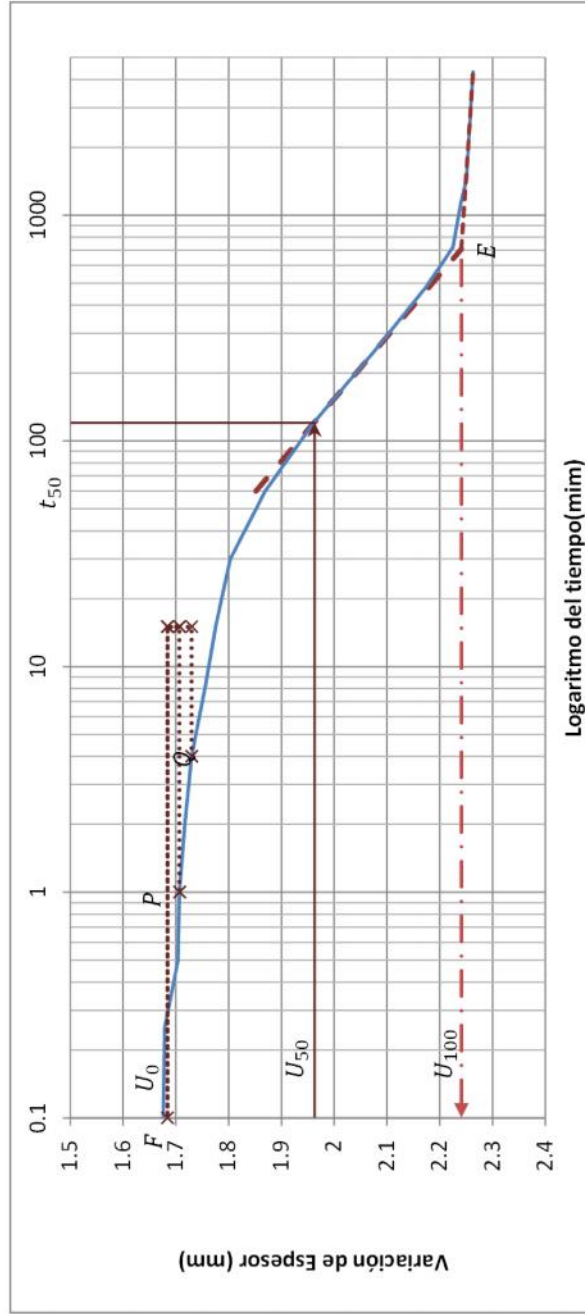
Diametro del anillo	6.59 cm
---------------------	---------

Altura del anillo	h	2.1 cm
-------------------	---	--------

t_p	1 min
t_Q	4 min

Parte lineal	Inicio	120 min
	Final	240 min

Tiempo (min)	Espesor (pulg)	Espesor (mm)
0.1	0.0660	1.6764
0.25	0.0661	1.6789
0.5	0.0671	1.7043
1	0.0672	1.7069
2	0.0676	1.7170
4	0.0681	1.7297
8	0.0691	1.7551
15	0.0699	1.7755
30	0.0710	1.8034
60	0.0736	1.8694
120	0.0772	1.9609
240	0.0815	2.0701
480	0.0856	2.1742
720	0.0876	2.2250
1140	0.0882	2.2403
1440	0.0886	2.2504
2880	0.0889	2.2581
4320	0.0891	2.2631



De la gráfica = para: $\Delta h_o = \Delta h_p - (\Delta h_Q - \Delta h_P) =$ de la gráfica: $\Delta h_{100} =$ 2.2405
 $t_p = 1 \text{ min}$ $\Delta h_{t_p} = 1.70688$
 $t_Q = 4.00 \text{ min}$ $\Delta h_{t_Q} = 1.72974$ $\Delta h_F = \Delta h_o = 1.68402$ $\Delta h_{50} = \Delta h_o - \frac{(\Delta h_{100} - \Delta h_o)}{2} = 1.9622$
 $d = 1.05 \text{ cm}$
 $C_v = 0.001810 \text{ cm}^2/\text{min}$ $t_{50} = 120.00$

Figura A.17: Resultado de coeficiente de consolidación vertical (Cv) ensayo 02

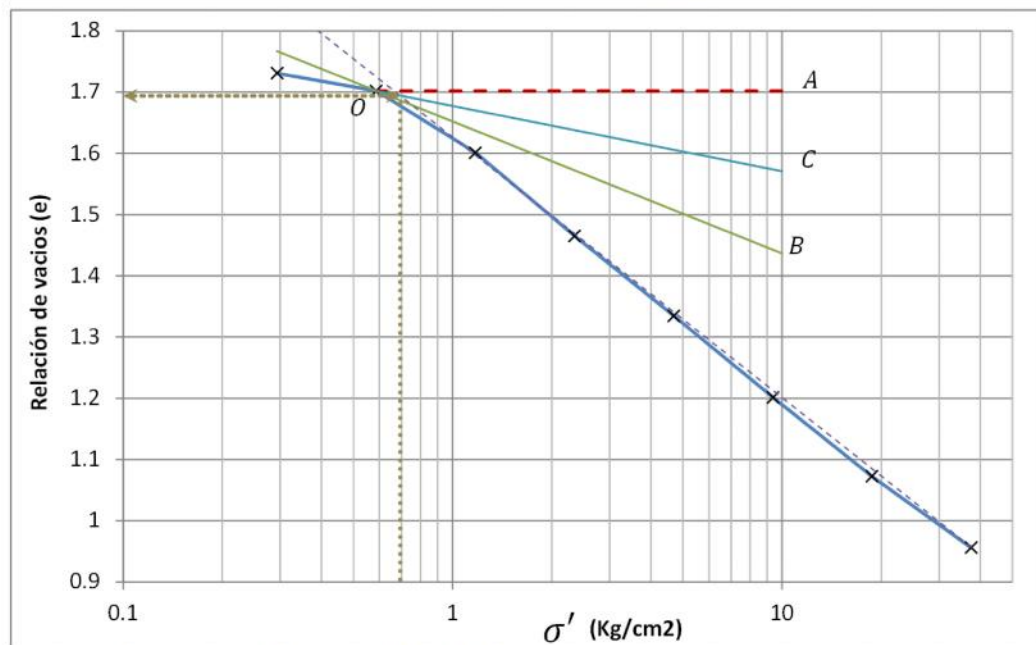
ANEXO 08

DETERMINACIÓN DE LA PRE-CONSOLIDACIÓN

Norma : NTP 339.154
Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO
Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO **Ensayo** : 02

Datos:
 Humedad de la muestra: 35.67 % $e_0 = \omega * G_s = 0.956$
 Espesor de la muestr: 2.1 cm $e_1 = e_0 - \Delta e$ $\Delta e = \frac{\Delta h}{h_0}(1 + e_0)$
 Gravedad específica: 2.68 gr/cm3

σ' (Kg/cm2)	$\Delta\sigma'$ (Kg/cm2)	h (pulg.)	h (mm)	Δh (mm)	Δe	e	$\log\sigma'$	$\Delta e/\Delta\sigma'$	m_v (cm2/Kg)
0		0.8268	21.00			1.760			
0.59	0.59	0.8095	20.56	-0.44	-0.058	1.702	-0.23	-0.0985	-0.0364
1.17	0.59	0.7793	19.79	-0.77	-0.101	1.601	0.07	-0.1719	-0.0661
2.35	1.17	0.7386	18.76	-1.03	-0.136	1.465	0.37	-0.1158	-0.0470
4.69	2.35	0.6994	17.76	-1.00	-0.131	1.334	0.67	-0.0558	-0.0239
9.38	4.69	0.6595	16.75	-1.01	-0.133	1.201	0.97	-0.0284	-0.0129
18.76	9.38	0.6209	15.77	-0.98	-0.129	1.072	1.27	-0.0137	-0.0066
37.53	18.76	0.5860	14.88	-0.89	-0.116	0.956		-0.0062	-0.0032



Ajuste del tramo lineal EF: $y = -0.43x + 1.62$

Del gráfico se obtienen:

Índice de compresibilidad, $C_c = 0.43$ pendiente de la porción recta

Por el método de Casagrande, el esfuerzo de preconsolidación $e_{\sigma'_p} = 0.69 \text{ Kg/cm}^2$

Figura A.18: Determinación de esfuerzos de Pre-consolidación ensayo 02

ANEXO 09

LECTURAS OBTENIDOS DEL CONSOLIDOMETRO

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

Ensayo : 01

DIMENSIONES DEL ANILLO		
Altura :	2.10	cm
Diámetro:	6.59	cm
Área :	34.11	cm ²

DIMENSIONES DE LA MUESTRA		
	INICIAL	FINAL
Peso del Anillo (gr.)	72	
W.Anillo + Muestra (gr.)	194.23	164.3

TIEMPO Minutos	LECTURA (Pulg.)						
	20Kg	40Kg	80Kg	160Kg	320Kg	640Kg	1280Kg
	0.58Kg/cm2	1.17Kg/cm2	2.34Kg/cm2	4.69Kg/cm2	9.38Kg/cm2	18.76Kg/cm2	37.52Kg/cm2
	0	0.0179	0.0469	0.0810	0.1205	0.1596	0.2030
0.10	0.0024	0.0204	0.0518	0.0842	0.1240	0.1640	0.2125
0.25	0.0027	0.0205	0.0520	0.0844	0.1242	0.1645	0.2129
0.50	0.0030	0.0207	0.0521	0.0850	0.1245	0.1650	0.2132
1.0	0.0032	0.0210	0.0522	0.0858	0.1248	0.1655	0.2135
2.0	0.0038	0.0215	0.0523	0.0865	0.1255	0.1662	0.2140
4.0	0.0042	0.0220	0.0532	0.0875	0.1265	0.1672	0.2145
8.0	0.0050	0.0229	0.0549	0.0890	0.1280	0.1686	0.2158
15.0	0.0060	0.0243	0.0560	0.0905	0.1302	0.1705	0.2177
30.0	0.0075	0.0260	0.0582	0.0932	0.1335	0.1732	0.2195
60.0	0.0092	0.0285	0.0608	0.0970	0.1372	0.1771	0.2230
120.0	0.0118	0.0321	0.0670	0.1020	0.1450	0.1828	0.2280
240.0	0.0143	0.0365	0.0728	0.1085	0.1520	0.1910	0.2326
480.0	0.0161	0.0410	0.0768	0.1150	0.1570	0.1968	0.2400
720.0	0.0168	0.0432	0.0785	0.1172	0.1585	0.2000	0.2425
1140.0	0.0171	0.0448	0.0795	0.1178	0.1591	0.2020	0.2440
1440.0	0.0173	0.0455	0.0798	0.1185	0.1592	0.2021	0.2445
2880.0	0.0178	0.0465	0.0805	0.1195	0.1594	0.2025	0.2452
4320.0	0.0179	0.0469	0.0810	0.1205	0.1596	0.2030	0.2456
Δh	0.0179	0.0290	0.0341	0.0395	0.0391	0.0434	0.0426

HUMEDAD Y PESO ESPECIFICO		
PRUEBA	INICIO	FINAL
peso Muestra Hum +Anillo (gr.)	194.23	164.30
peso muestra Seca +Anillo (gr.)	146.92	146.92
peso del anillo (gr.)	72.00	72.00
Peso muestra seca (gr)	74.92	74.92
Volumen de la muestra (cm3)	71.63	50.35
Humedad. (%)	63.15	23.20
Peso específico (gr/cm3)	1.05	1.49

Figura A.19: Registro de datos del consolidómetro del de ensayo 01

ANEXO 09

LECTURAS OBTENIDOS DEL CONSOLIDOMETRO

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

Ensayo : 01

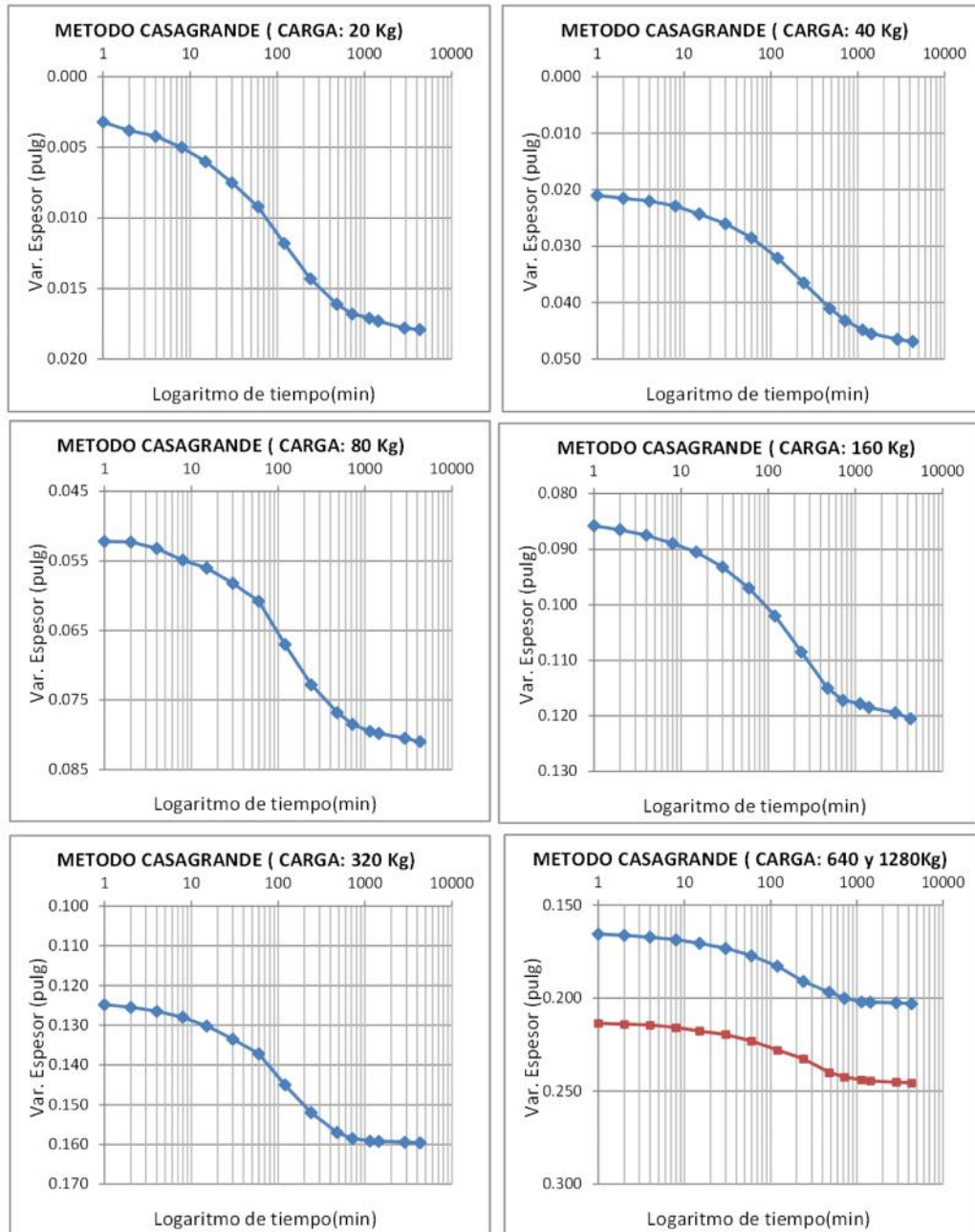


Figura A.20: Gráfica de los datos por logaritmo de tiempo ensayo 02.

ANEXO 10

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE VERTICAL DE CONSOLIDACION (Anexo 08)

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

Ensayo : 01

Carga: 0.58Kg/cm²

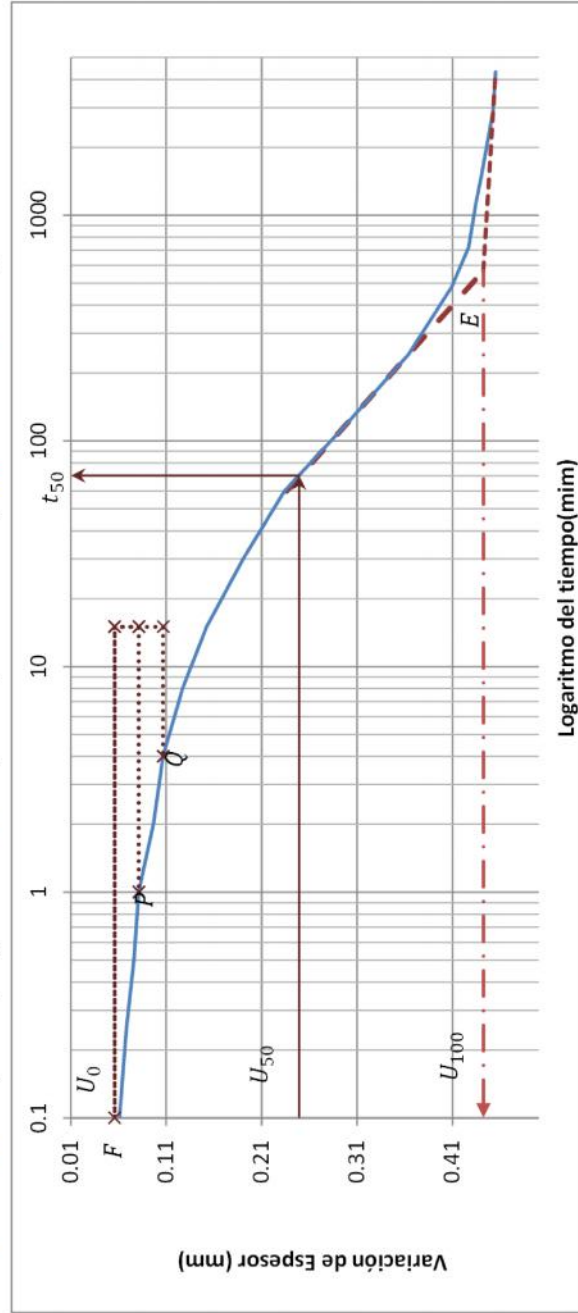
Diametro del anillo	6.59 cm
---------------------	---------

Altura del anillo	h	2.1 cm
-------------------	---	--------

t_p	1 min
t_Q	4 min

Parte lineal	Inicio	120 min
	Final	240 min

Tiempo (min)	Esesor (pulg)	Esesor (mm)
0.1	0.0024	0.0610
0.25	0.0027	0.0686
0.5	0.003	0.0762
1	0.0032	0.0813
2	0.0038	0.0965
4	0.0042	0.1067
8	0.005	0.1270
15	0.006	0.1524
30	0.0075	0.1905
60	0.0092	0.2337
120	0.0118	0.2997
240	0.0143	0.3632
480	0.0161	0.4089
720	0.0168	0.4267
1140	0.0171	0.4343
1440	0.0173	0.4394
2880	0.0178	0.4521
4320	0.0179	0.4547



De la gráfica = para: $\Delta h_o = \Delta h_p - (\Delta h_Q - \Delta h_p) =$ de la gráfica: $\Delta h_{100} =$ 0.4419
 $t_p = 1$ min $\Delta h_p = 0.08128$
 $t_Q = 4.00$ min $\Delta h_Q = 0.10668$ $\Delta h_F = \Delta h_o = 0.05588$ $\Delta h_{50} = \Delta h_o - \frac{(\Delta h_{100} - \Delta h_o)}{2} = 0.2489$
 $d = 1.05$ cm $t_{50} = 70.00$ min
 $C_v = 0.003103$ cm²/min

Figura A.21: Resultado de coeficiente de consolidación vertical (Cv) ensayo 01

ANEXO 11

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE VERTICAL DE CONSOLIDACION (Anexo 08)

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Ubicación : C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO

Carga: 1.17Kg/cm2

Ensayo : 01

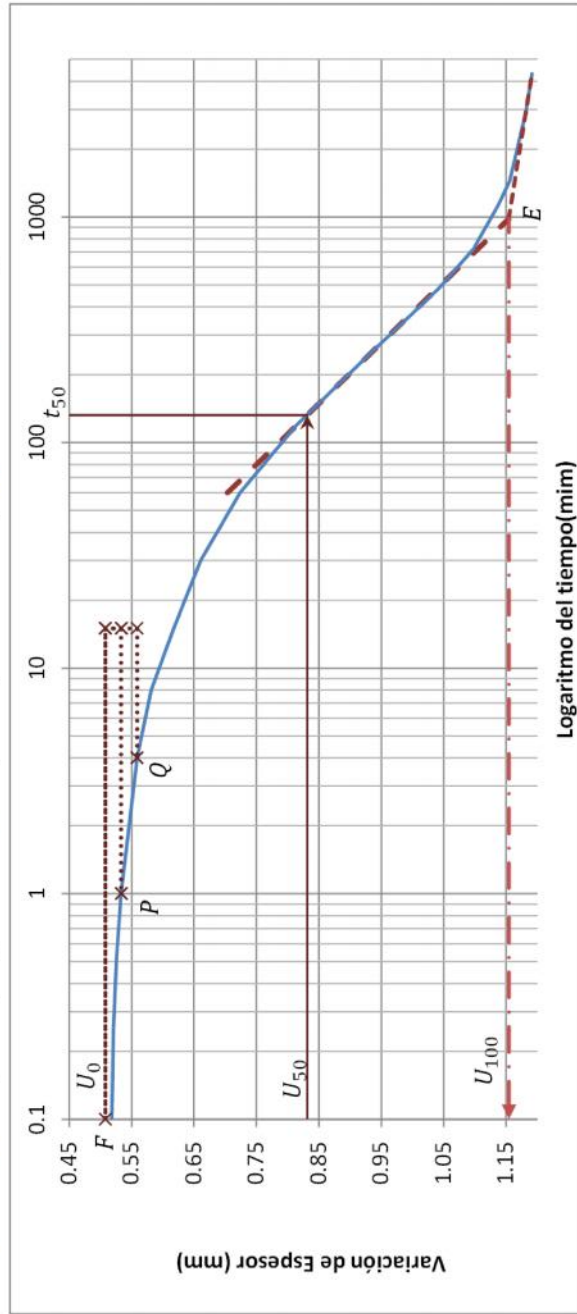
Diametro del anillo	
6.59 cm	

Altura del anillo	
h 2.1 cm	

t_p	1 min
t_q	4 min

Parte lineal	
Inicio	120 min
Final	240 min

Tiempo (min)	Espesor (pulg)	Espesor (mm)
0.1	0.0204	0.5182
0.25	0.0205	0.5207
0.5	0.0207	0.5258
1	0.021	0.5334
2	0.0215	0.5461
4	0.022	0.5588
8	0.0229	0.5817
15	0.0243	0.6172
30	0.026	0.6604
60	0.0285	0.7239
120	0.0321	0.8153
240	0.0365	0.9271
480	0.041	1.0414
720	0.0432	1.0973
1140	0.0448	1.1379
1440	0.0455	1.1557
2880	0.0465	1.1811
4320	0.0469	1.1913



De la gráfica = para: $\Delta h_o = \Delta h_p - (\Delta h_q - \Delta h_p) =$ de la gráfica: $\Delta h_{100} = 1.1541$
 $t_p = 1$ min $\Delta h_p = 0.53340$
 $t_q = 4.00$ min $\Delta h_q = 0.55880$ } $\Delta h_F = \Delta h_o = 0.50800$ $\Delta h_{50} = \Delta h_o - \frac{(\Delta h_{100} - \Delta h_o)}{2} = 0.8311$
 $d = 1.05$ cm
 $C_v = 0.001645$ cm²/min $t_{50} = 132.00$ min

Figura A.22: Resultado de coeficiente de consolidación vertical (Cv) ensayo 01

ANEXO 12

DETERMINACIÓN DE LA PRE-CONSOLIDACIÓN										
Norma	: NTP 339.154									
Tesis	: DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO									
Ubicación	: C.E. DE MOYA-DIST. QUINUA-HUAMANGA-AYACUCHO						Ensayo	: 01		
Datos:										
Humedad de la muestra:	35.67 %			$e_0 = \omega * G_s =$	0.956					
Espesor de la muestr:	2.1 cm					$\Delta e = \frac{\Delta h}{h_0} (1 + e_0)$				
Gravedad específica:	2.68 gr/cm3			$e_1 = e_0 - \Delta e$						
σ' (Kg/cm2)	$\Delta\sigma'$ (Kg/cm2)	Lec. Dial (pulg.)	Esp. muestr. (mm)	Δh (mm)	Δe	e	$\log \sigma'$	$\Delta e / \Delta \sigma'$	m_v (cm2/Kg)	
0.29		0.0000	21.00			1.855				
	0.29			-0.45	-0.062			-0.2109	-0.0755	
0.59		0.0179	20.55			1.794	-0.23			
	0.59			-0.74	-0.100			-0.1708	-0.0634	
1.17		0.0290	19.81			1.694	0.07			
	1.17			-0.87	-0.118			-0.1004	-0.0390	
2.35		0.0341	18.94			1.576	0.37			
	-1.17			0.25	0.035			-0.0295	-0.0113	
1.17		-0.0100	19.20			1.610	0.07			
	-0.59			0.28	0.039			-0.0660	-0.0249	
0.59		-0.0112	19.48			1.649	-0.23			
	-0.29			0.24	0.033			-0.1119	-0.0417	
0.29		-0.0095	19.72			1.682	-0.53			
	0.29			-0.06	-0.008			-0.0259	-0.0097	
0.59		0.0022	19.67			1.674	-0.23			
	0.59			-0.24	-0.032			-0.0548	-0.0207	
1.17		0.0093	19.43			1.642	0.07			
	1.17			-0.87	-0.118			-0.1004	-0.0398	
2.35		0.0341	18.56			1.524	0.37			
	2.35			-1.00	-0.136			-0.0582	-0.0244	
4.69		0.0395	17.56			1.388	0.67			
	4.69			-0.99	-0.135			-0.0288	-0.0128	
9.38		0.0391	16.57			1.253	0.97			
	9.38			-1.10	-0.150			-0.0160	-0.0076	
18.76		0.0434	15.47			1.103	1.27			
	18.76			-1.08	-0.147			-0.0078	-0.0040	
37.53		0.0426	14.38			0.956				

De la curva de logaritmo esfuerzo efectivo vs relación de vacíos se determinó el valor de esfuerzo de pre-consolidación

$$\sigma'_p = 0.945 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo efectivo inicial se determinó del ensayo consolidación en laboratorio que es:

$$\sigma'_0 = 0.29 \text{ kg/cm}^2$$

Por el método de Schmertmann se determino el Cs de campo

$$C_s = -0.12159$$

Los valores de Cc, e₀, e₁ y e₂ para un esfuerzo efectivo de 0.59 kg/cm²

$$e_0 = 1.917875 \quad e_1 = 1.855 \quad e_2 = 1.890 \quad C_c = -0.16866$$

Los valores de Cc, e₀, e₁ y e₂ para un esfuerzo efectivo de 1.17kg/cm²

$$e_0 = 1.917875 \quad e_1 = 1.855 \quad e_2 = 1.800 \quad C_c = -0.59831$$

Figura A.23: Resultado de índice de compresión y expansión, Relación de vacíos inicial, de pre consolidación y final por método de Schmertmann para el ensayo 01

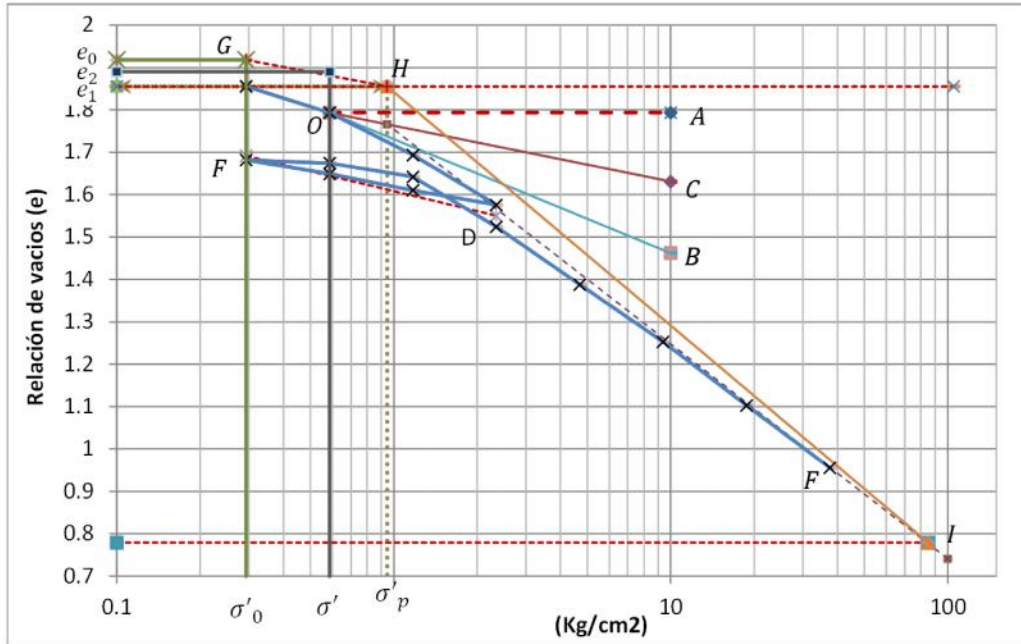
ANEXO 12

DETERMINACIÓN DE LA PRE-CONSOLIDACIÓN

Norma : NTP 339.154

Tesis : DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA CIMENTACION EN ARCILLAS DEL CENTRO EDUCATIVO DE MOYA, DISTRITO DE QUINUA-AYACUCHO

Resultado del Grafico Utilizando el Método de Schmertmann: Esfuerzo efectivo 0.59 kg/cm²



Resultado del Grafico Utilizando el Método de Schmertmann: Esfuerzo efectivo 1.17 kg/cm²

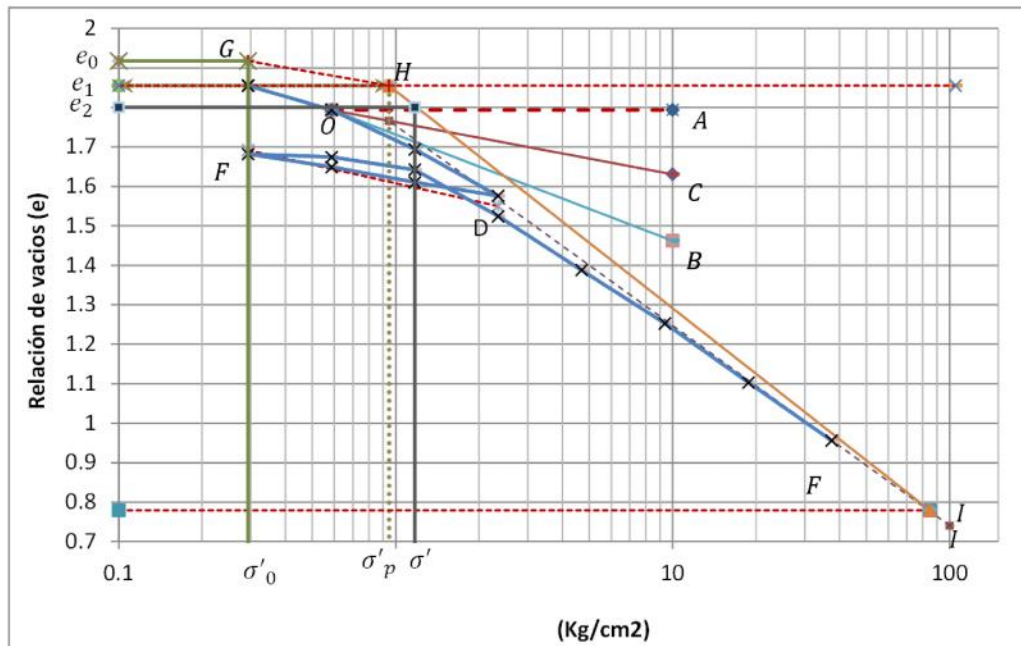


Figura A.24: Gráficos de logaritmo de esfuerzos efectivos vs relación de vacíos por método de Schmertmann para el ensayo 01

Apéndice B

Sub-rutina “Isocronas”

```

function calcular_Analitico(hObject, eventdata, handles)
k=get(handles.cv,'String');
T0=get(handles.esfuerzo,'String');
L=get(handles.altura,'String');
N=get(handles.tiempo,'String');
k=str2double(k);
T0=str2double(T0);
L=str2double(L);
N=str2double(N);
u0=T0;
dx=L/10;
x_vec=0:dx:L;
dt=N/50;
Tv=N;
H=L;
% intervalos o variaciones de Tv y H.
vtv=dt;
vh=dx;
vah=0:vh:H;
vat=0:vtv:Tv;
u_mat=zeros(length(vah),length(vat));
for j=1:length(vat)
    tv1=zeros(length(vah),1);
    for i=1:length(vah)
        for m=1:20
            M1=0.5*pi*(2*m-1)/H;
            tv1(i,1)=tv1(i)+2*u0*((-1)^(m-1))/(H*M1)*cos(M1*vah(i))*exp(-
k*(M1^2)*vat(j));
        end
    end
    for i=1:length(vah)
        u_mat(i,j)=tv1(i,1);
    end
end

I1=ones(length(vah),length(vat));
for j=1:length(vat)
    for i=1:length(vah)
        I1(i,j)=u0;
    end
end
u1=I1-u_mat;
for i=1:length(vah)
    Tv(i,1)=u1(i,end);
end
plot(u1,vah)
xlabel('U')
ylabel('z/H')
set(handles.registro,'String',num2str(Tv));
a1=xlswrite('Metodo_Analitico.xlsx',u1,1);
u1

```

Figura B.1: Algoritmo en Matlab R2016a, método analítico

```

function calcular_Implicito(hObject, eventdata, handles)
k=get(handles.cv, 'String');
T0=get(handles.esfuerzo, 'String');
L=get(handles.altura, 'String');
N=get(handles.tiempo, 'String');
k=str2double(k);
T0=str2double(T0);
L=str2double(L);
N=str2double(N);
Tn=T0;
dx=L/10;
x_vec=0:dx:L;
dt=N/100;
t_vec=0:dt:N;
ds=k*dt/dx^2;
T_mat=zeros(length(x_vec),length(t_vec)-2);
for j=1:length(t_vec)-2
T_mat(1,j)=T0;
T_mat(length(x_vec),j)=Tn;
end
    vT=zeros(length(x_vec)-2,1);
vT(1,1)=ds*T0;
vT(length(vT),1)=ds*Tn;
vtt=zeros(length(x_vec)-2,1);
T_mat11=zeros(length(x_vec)-2,length(x_vec)-2);
T_mat11(length(x_vec)-2,length(x_vec)-2)=1+2*ds;
for i=1:length(x_vec)-3
T_mat11(i,i)=1+2*ds; T_mat11(i+1,i)=-ds; T_mat11(i,i+1)=-ds;
end
for j=1:length(t_vec)-2
vT=zeros(length(x_vec)-2,1);
vT(1,1)=ds*T0;
vT(length(vT),1)=ds*Tn;
    vT=vT+vtt;
for i=1:length(x_vec)-1
vr=inv(T_mat11)*vT;
vtt=vr;
end
for i=1:length(x_vec)-2
    T_mat(i+1,j)=vr(i,1);
end
end
Tv=zeros(length(x_vec),1);
for i=1:length(x_vec)
    Tv(i,1)=T_mat(i,end);
end
xvec=0:dx:L; tvec=0:dt:N+2*dt; ds=k*dt/dx^2;
[yy,zz]=size(T_mat);
T_mat1=ones(yy,zz);
T_mat2=T_mat1-T_mat;
[tt,xx]=meshgrid(tvec,xvec);
plot(T_mat,xvec)
xlabel('U')
ylabel('z/H')
set(handles.registro, 'String', num2str(Tv));
al=xlswrite('Metodo_implicito.xlsx',T_mat,1);
T_mat

```

Figura B.2: Algoritmo en Matlab R2016a, método implícito

```

function calcular_Crank-Nicholson(hObject, eventdata, handles)
k=get(handles.cv, 'String');
T0=get(handles.esfuerzo, 'String');
L=get(handles.altura, 'String');
N=get(handles.tiempo, 'String');
k=str2double(k);
T0=str2double(T0);
L=str2double(L);
N=str2double(N);
Tn=T0;
dx=L/10;
x_vec=0:dx:L;
dt=N/100;
t_vec=0:dt:N;
ds=k*dt/dx^2;
T_mat=zeros(length(x_vec)-2,length(t_vec)-2);
for j=1:length(t_vec)-2
T_mat(1,j)=T0;
T_mat(length(x_vec),j)=Tn;
end
vT=zeros(length(x_vec)-2,1);
T_mat11=zeros(length(x_vec)-2,length(x_vec)-2);
T_mat11(length(x_vec)-2,length(x_vec)-2)=2+2*ds;
for i=1:length(x_vec)-3
T_mat11(i,i)=2+2*ds; T_mat11(i+1,i)=-ds; T_mat11(i,i+1)=-ds;
T_mat11(1,1)=2+2*ds;
end
vtt=zeros(length(x_vec)-2,1);
for j=1:length(t_vec)-2
vT=zeros(length(x_vec)-2,1);
vT(1,1)=(2*ds)*T0+(2-2*ds)*vtt(1,1)+ds*vtt(2,1);
vT(length(vT),1)=(2*ds)*Tn+(2-2*ds)*vtt(length(vT),1)+ds*vtt(length(vT)-
1,1);
for i=2:length(vT)-1
vT(i,1)=vT(i,1)+(2-2*ds)*vtt(i,1)+ds*vtt(i+1,1)+ds*vtt(i-1,1);
end
vr=inv(T_mat11)*vT;
vtt=vr;
for i=1:length(x_vec)-2
T_mat(i+1,j)=vr(i,1);
end
end
Tv=zeros(length(x_vec),1);
for i=1:length(x_vec)
Tv(i,1)=T_mat(i,end);
end
xvec=0:dx:L; tvec=0:dt:N+2*dt; ds=k*dt/dx^2; [yy,zz]=size(T_mat);
T_mat1=ones(yy,zz); T_mat2=T_mat1-T_mat;
[tt,xx]=meshgrid(tvec,xvec);
plot(T_mat,xvec)
xlabel('U')
ylabel('z/H')
set(handles.registro, 'String', num2str(Tv));
a1=xlswrite('Metodo_Crank_nicholson.xlsx',T_mat,1);
T_mat

```

Figura B.3: Algoritmo en Matlab R2016a, método Crank Nicholson

Apéndice C

Método de ajuste para C_v

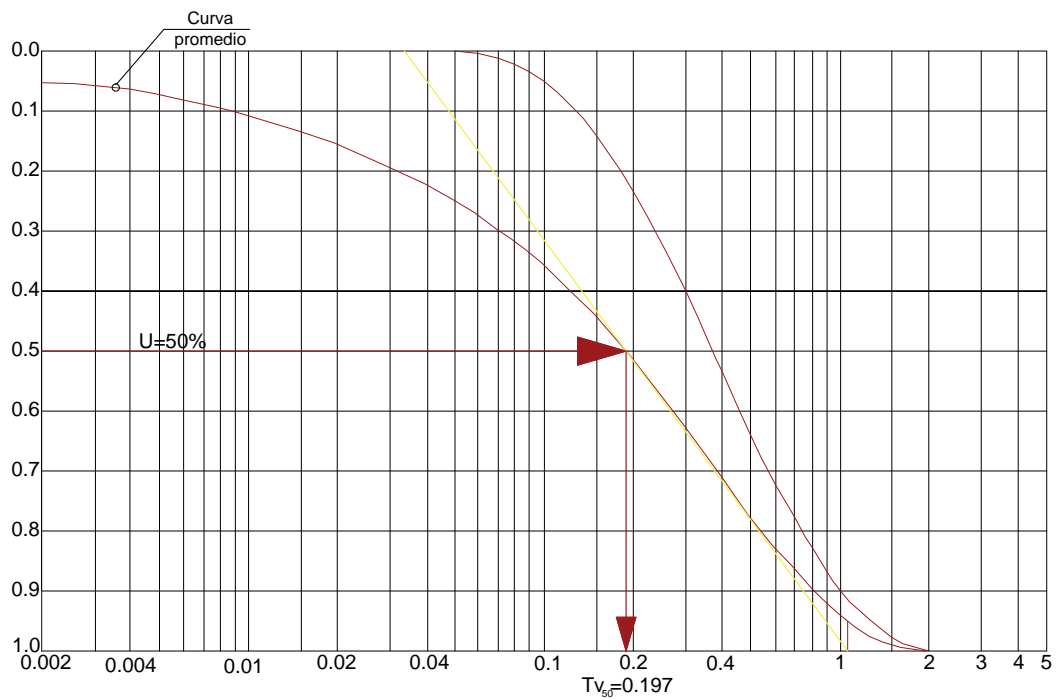


Figura C.1: Curva teórica de consolidación

$$C_v = \frac{T_{v50} * H^2}{t_{50}}$$

Apéndice D

Planos

1. Plano de Ubicación.
2. Plano de Geología.

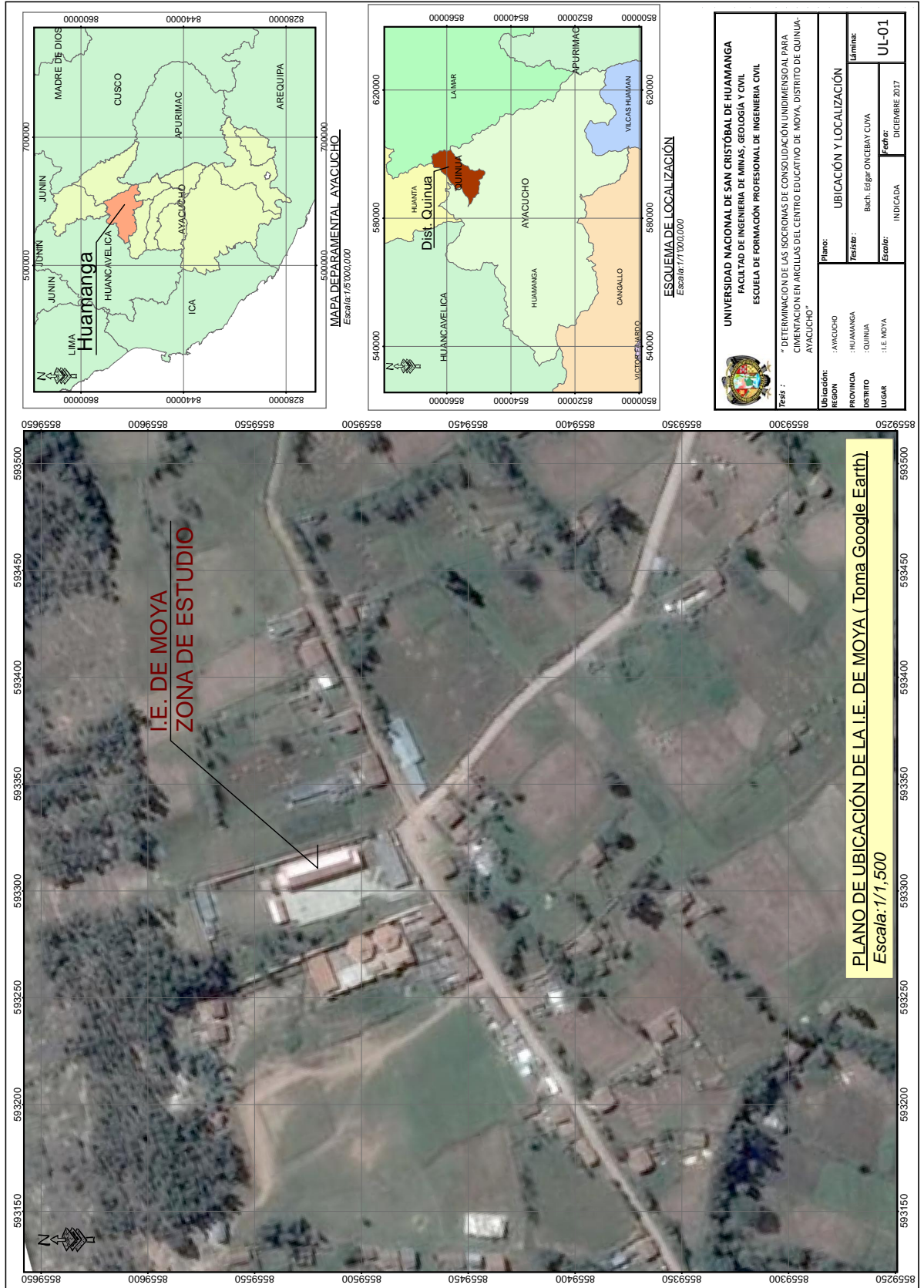


Figura D.1: Plano de Ubicación

