



**Universidad
de Jaén**

Escuela Politécnica Superior
de Linares

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE UNA PARCELA POR TÉCNICAS DIRECTAS E INDIRECTAS

Alumno: Vicente Óscar Ondó Mayié

Tutor: Prof. D. Rosendo Mendoza Vílchez

Tutor: Prof. D. Sergio Martínez Martínez

Depto.: Ingeniería mecánica y minera

Septiembre, 2024

AGRADECIMIENTOS

Agradecer primero a mis familiares los que siempre me han apoyado y alentado a seguir cuando sentía que no valía la pena continuar, en especial a mis dos abuelas doña María Magdalena Ondo Mayié y doña Cándida Eyang las cuales fueron profesoras y me educaron e inculcaron los valores que me hacen ser la persona que soy hoy, a mi madre Maria Rosario Meyie Ondo por siempre ser un apoyo en los momentos de zozobra a mi tío Lucio Rafel Nzé por siempre echarme una mano y por ultimo a mis tías Juanita, Beatriz y Emilita Ondo Mayié las cuales siempre me alentaron y siguen alentando a superarme.

Por último, agradecer a los profesores de la Universidad de Jaén que hicieron un poco más ameno mi paso por la universidad, en especial a Federico Villanueva Leal, el cual durante mi último año estuvo dándome consejos y creyendo en mí, y no puedo acabar sin agradecer de todo corazón a mis profesores y tutores del TFG Don Rosendo Mendoza y Don Sergio Martínez por ayudarme a concluir el trabajo.

“Mbeng one’e midjuk ayet” (proverbio fang)

“la felicidad se halla trabajando y esforzándose cada día”

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	1
ÍNDICE GENERAL	3
LISTADO DE FIGURAS.....	7
LISTADO DE TABLAS	13
LISTADO DE ECUACIONES	16
SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	18
RESUMEN	21
ABSTRACT	23
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	25
OBJETIVOS.....	27
BLOQUE I. MATERIALES Y MÉTODOS	29
1.1. Introducción a las técnicas de Prospección Geofísica.	30
1.1.1. Métodos de Prospección Geofísica.....	31
1.2. Tomografía eléctrica (ERT).....	36
1.3. Ensayos geotécnicos.....	43
1.3.1. Introducción a la geotecnia.....	43
1.3.2. Propiedades de los suelos.	43
1.3.3. Fundamento y descripción teórica de ensayos.	45
1.3.3.1. Ensayos in situ. Ensayo de penetración dinámica tipo Borros (ISO 22476-2:2005).....	45
1.3.3.2. Ensayos en laboratorio.....	53
1.3.3.2.1. Preparación de muestras para ensayos de suelos (UNE 103 1000:1995).....	53
1.3.3.2.2. Determinación de la humedad (UNE-EN 12880:2015).	54
1.3.3.2.3. Determinación de los límites de Atterberg (UNE-EN ISO 17892-12:2018).....	57
1.3.3.2.4. Análisis granulométrico (ISO “PARTE4” 17892-4:2016).....	69

1.3.3.2.5. Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe (UNE 103600:1999).	81
BLOQUE II. REGIÓN DE ESTUDIO	85
2.1. Localización geográfica de la zona de trabajo.	86
2.2. Marco geológico en la zona de trabajo.	87
2.3. Sismicidad.	89
2.4. Climatología.	90
BLOQUE III. TRABAJO DE CAMPO	91
3.1. Introducción.	92
3.2. Campaña ERT.	92
3.3. Campaña de Ensayos de penetración dinámica.	95
3.4. Nivel freático.	103
BLOQUE IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	104
4.1. Resultados de Tomografía Eléctrica.	105
4.1.1. Tratamiento de los datos de campo.	105
4.1.2. Resultados de la resistividad real.	106
4.2. Resultados Geotécnicos.	108
4.2.1. Gráficos de ensayos de penetración dinámica.	114
4.2.2. Cálculo de la carga admisible.	116
4.2.3. Ensayos en laboratorio.	121
4.2.3.1. Determinación de la humedad.	122
4.2.3.2. Determinación de los límites de Atterberg.	124
4.2.3.3. Análisis granulométrico.	134
4.2.3.4. Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe.	141
4.3. Comparativa de los resultados de tomografía eléctrica y de los ensayos de penetración dinámica.	149
CONCLUSIONES.	151

BIBLIOGRAFÍA..... 153

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de la forma de medición y obtención de resultados en SEV. Fuente: Trabajo “importancia de los registros geofísicos” de Jesús Mendoza-Schlumberger....	32
Figura 2. Obtención de datos anómalos por el método de PI. Fuente: PROGEO (empresa), métodos eléctricos	33
Figura 3. Aparataje para el método de Georradar y forma de medición. Fuente: Google: GPR3D, método georradar	33
Figura 4. Forma de medición. Fuente: página web: https://www-ig.unil.ch/geophyse/pro18e.htm	34
Figura 5. Forma de obtención de muestras. Fuente: geodatos.cl, método magnetotelérfico	36
Figura 6. Configuración para medir. Fuente: Universidad Nacional de Tucumán, gravimetría mediciones e interpretación.....	38
Figura 7. Configuración del dispositivo SCHLUMBERGER.....	39
Figura 8. Configuración del dispositivo WENNER	40
Figura 9. Configuración del dispositivo LEE.....	40
Figura 10. Resumen de las propiedades del suelo	45
Figura 11. Puntaza tipo fija para ensayo de penetración dinámica	47
Figura 12. Puntaza tipo perdida para ensayo de penetración dinámica.....	47
Figura 13. Ejemplo de estadillo de campo con el esquema de las investigaciones geotécnicas realizadas.....	51
Figura 14. Ejemplo de registro de los valores obtenidos en el ensayo de penetración dinámica	52
Figura 15. Equipo de medida para el ensayo mediante el procedimiento de caída de cono. Fuente: normativa AENOR	58
Figura 16. Detalle del cono de caída. Fuente: normativa AENOR	59
Figura 17. Esquema de la cuchara de Casagrande. Fuente: normativa AENOR.....	61
Figura 18. Requisitos del cono de penetración.....	63

Figura 19. Detalle del procedimiento de la Cuchara de Casagrande.....	64
Figura 20. Ejemplo del resultado de un ensayo de limite liquido con el método del cono de caída con el cono de 60 g. Fuente: AENOR.....	66
Figura 21. Ejemplo del resultado del ensayo de determinación. Fuente: AENOR	67
Figura 22. Procedimiento general de sedimentación. Fuente: AENOR.....	77
Figura 23. Procedimiento combinado general. Fuente: normativa AENOR.....	80
Figura 24. Ejemplo de resultado de distribución de tamaño de partículas. Fuente: normativa AENOR	81
Figura 25. Gráfica para el cálculo del cambio de volumen potencial	84
Figura 26. situación, área y perímetro. Fuente: sede catastro España	86
Figura 27. Datos descriptivos. Fuente: Catastro electrónico de España.....	86
Figura 28. Mapa geológico de España. Hoja 905 “Linares” a 1:50.000 con señalización de la zona de estudio (Punto azul). Fuente: IGME.....	88
Figura 29. Leyenda (tramo TBc3-Bc11-12). Fuente: IGME, Hoja 905 “Linares”	88
Figura 30. Representación sismología anual en Linares. Fuente: Vulcano Discovery, Linares	89
Figura 31. Interpretación del rango de sismicidad MKS. Fuente: Vulcano Discovery..	90
Figura 32. Gráfica de temperaturas promedio en Linares. Fuente: Vulcano Discovery, Linares	90
Figura 33. Temperatura. Fuente: Google tiempo Linares.	92
Figura 34. Colocación de los electrodos. Fuente: propia	93
Figura 35. Conexión del cableado y los electrodos. Fuente: propia.....	94
Figura 36. Temperatura para la primera campaña de campo de penetración dinámica. Fuente: Google tiempo Linares	95
Figura 37. Croquis de la disposición de los penetros y perfil ERT en la zona de estudio. Fuente: propia.....	96

Figura 38. Temperatura para la segunda campaña de campo de penetración dinámica. Fuente: Google tiempo Linares	96
Figura 39. Equipamiento completo, mecanismo de elevación, arranque del equipo, varilla y puntaza, muestra de señalización cada 20 cm, funcionamiento del equipo. Fuente: propia	99
Figura 40. Características del equipo de penetración dinámica	100
Figura 41. Características de la puntaza para el ensayo de penetración dinámica	101
Figura 42. Certificado de calibración del penetrómetro	102
Figura 43. Detalle del varillaje al alcanzar el nivel freático en el primer penetro realizado. Fuente: propia	103
Figura 44. Representación del filtrado realizado en Prosys III	105
Figura 45. Perfil de resistividad real configuración dipolo-dipolo y número de golpes obtenidos en los penetros.....	106
Figura 46. Perfil de resistividad real configuración wenner-schulumberger y número de golpes obtenidos en los penetros	107
Figura 47. Diagrama de barras con los resultados obtenidos en el ensayo de penetración dinámica tipo borros. Penetro 1. Fuente: propia.....	115
Figura 48. Diagrama de barras con los resultados obtenidos en el ensayo de penetración dinámica tipo borros. Penetro 2. Fuente: propia.....	116
Figura 49. Campaña de recogida de material cada 20 cm para ensayos de laboratorio. Fuente: propia	122
Figura 50. Representación gráfica de los resultados de humedad obtenidos en la zona de muestreo2 (20-100 cm).....	123
Figura 51. Detalles del ensayo de determinación de la humedad: cuarteador de muestras; vidrios de reloj para muestras; muestras preparadas antes de estufa; estufa con las muestras tras el ensayo. Fuente: propia	124
Figura 52. Representación del límite líquido para la muestra 0-20 cm. Fuente: propia.	126

Figura 53. Representación del límite líquido para la muestra 20-40 cm. Fuente: propia	126
Figura 54. Representación del límite líquido para la muestra 40-60 cm. Fuente: propia	127
Figura 55. Representación del límite líquido para la muestra 60-80 cm. Fuente: propia	127
Figura 56. Representación del límite líquido para la muestra 80-100 cm. Fuente: propia	128
Figura 57. Gráfica de plasticidad de la muestra 0-20	130
Figura 58. Gráfica de plasticidad de la muestra 20-40	131
Figura 59. Gráfica de plasticidad de la muestra 40-60	131
Figura 60. Gráfica de plasticidad de la muestra 60-80	132
Figura 61. Gráfica de plasticidad de la muestra 80-100	132
Figura 62. Gráfica de plasticidad comparativa para las diferentes muestras. 0-20 (rosa); 20-40 (azul); 40-60 (amarillo); 60-80 (naranja); 80-100 (rojo).....	133
Figura 63. Ábaco para la caracterización del suelo. Fuente: AENOR	133
Figura 64. Diferentes pasos para la determinación de los límites de Atterberg. Fuente: propia	134
Figura 65. Curva granulométrica de la muestra 0-20. Fuente. propia.	137
Figura 66. Curva granulométrica de la muestra 20-40. Fuente. Propia.....	138
Figura 67. Curva granulométrica de la muestra 40-60. Fuente. Propia.....	138
Figura 68. Curva granulométrica de la muestra 60-80. Fuente. Propia.....	139
Figura 69. Curva granulométrica de la muestra 80-100. Fuente. Propia.....	139
Figura 70. Comparativa de las curvas granulométricas obtenidas para todas las muestras: 0-20 (verde claro); 20-40 (morado); 40-60 (naranja); 60-80 (verde oscuro); 80-100 (azul)	140
Figura 71. Representación del resultado para la muestra 0-20.....	142

Figura 72. Representación del resultado para la muestra 20-40.....	143
Figura 73. Representación del resultado para la muestra 40-60.....	144
Figura 74. Representación del resultado para la muestra 60-80.....	145
Figura 75. Representación del resultado para la muestra 80-100.....	146
Figura 76. Resumen de los valores obtenidos para todas las muestras: 0-20 (morado); 20-40 (negro); 40-60 (azul); 60-80 (verde); 80-100 (rojo).	147
Figura 77. Detalles del procedimiento de realización del ensayo para la determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe. Fuente: propia.	148

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones y masas de los cuatro tipos de aparatos para ensayos de penetración dinámica. Fuente: normativa AENOR.....	49
Tabla 2. Datos de precisión para el contenido de materia seca. Fuente: AENOR	57
Tabla 3. Conjunto de conos de caída-especificaciones típicas de fabricación relativas a masa y dimensiones.....	60
Tabla 4. Requisitos del cono de penetración	63
Tabla 5. Requisitos para el ensayo de la Cuchara de Casagrande.....	65
Tabla 6. Masas mínimas recomendadas para el tamizado. Fuente: AENOR.....	74
Tabla 7. Masas máximas de suelo retenidas en cada tamiz. Fuente: AENOR.....	75
Tabla 8. Procedimiento operatorio para compactación de suelos. Fuente: AENOR.....	82
Tabla 9. Estadillo de campo con los resultados del penetrometro 1	109
Tabla 10. Estadillo de campo con los resultados del penetrometro 2.....	112
Tabla 11. Valores obtenidos de resistencia dinámica y carga admisible para el penetrometro 1	117
Tabla 12. Valores obtenidos de resistencia dinámica y carga admisible para el penetrometro 2	120
Tabla 13. Resultados del ensayo de determinación de la humedad (w) en % para diferentes profundidades	123
Tabla 14. Datos del ensayo de determinación de los límites de Atterberg.....	124
Tabla 15. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 0-20	128
Tabla 16. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 20-40	128
Tabla 17. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 40-60	129
Tabla 18. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 60-80	129
Tabla 19. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 80-100	129
Tabla 20. Resultados para el Índice de plasticidad.....	129
Tabla 21. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 0-20	134

Tabla 22. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 20-40	135
Tabla 23. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 40-60	135
Tabla 24. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 60-80	136
Tabla 25. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 80-100	136
Tabla 26. Resultado de la fuerza del ensayo del aparato Lambe.....	141
Tabla 27. Resultado para el Índice de hinchamiento.....	141

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula de la resistividad aparente	39
Ecuación 2. Fórmula de la constante geométrica	40
Ecuación 3. Fórmula de la constante geométrica	40
Ecuación 4. Fórmula del factor geométrico.....	41
Ecuación 5. Fórmula para el cálculo de la resistividad	41
Ecuación 6. Fórmula de la resistencia dinámica.....	53
Ecuación 7. Fórmula para el cálculo del contenido de materia seca de la muestra.....	56
Ecuación 8. Fórmula para el cálculo del contenido de materia húmeda de la muestra..	56
Ecuación 9. Fórmula del cálculo del porcentaje de material inferior a 0,4 mm.....	66
Ecuación 10. Fórmula de cálculo del Índice de Plasticidad (IP)	68
Ecuación 11. Fórmula para el cálculo del diámetro mínimo	74
Ecuación 12. Fórmula de la masa máxima del suelo retenido.....	76
Ecuación 13. Fórmula para el cálculo del Índice de plasticidad	129

SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

GPR	Radar de penetración en el suelo
SEV	Sondeo eléctrico vertical
CE	Calicata eléctrica
PI	Polaridad inducida
PE	Polaridad espontánea
ERT	Tomografía eléctrica
UNE	Una norma española
DPL	Ensayo de penetración dinámica ligera
DPM	Ensayo de penetración dinámica mediana
DPH	Ensayo de penetración dinámica pesada
DPSH	Ensayo de penetración dinámica super pesada
W_{dr}	Contenido de materia seca de la muestra
W_w	Humedad de la muestra
m_a	Peso de la cápsula vacía
m_b	Peso de la cápsula que contiene la muestra seca del suelo
m_c	Peso de la cápsula que contiene la muestra seca del suelo
F	Factor de conservación (equivale a 100)
W_l	Límite líquido
W_p	Límite plástico
W	Contenido de humedad
IP	Índice de plasticidad
IGM	Instituto geológico y minero de España
CTE	Código técnico de edificación
MKS	Escala internacional macro sísmica
R_d	Resistencia dinámica
Q_a	Carga admisible
S_m	Masa de arena necesaria para llenar el cono
V_h	Volumen de agujero excavado
P_h	Presión de hinchamiento
D_{max}	Diámetro máximo
d_r	Diámetro de la barra
AENOR	Asociación española de normalización y certificación

E	Penetración por golpe.20/N ₂₀
H/h	Altura

RESUMEN

En el presente trabajo fin de grado se analiza y caracteriza el terreno de una parcela ubicada en la urbanización “Los Almendros”, localizada en el término municipal de Linares (Jaén). El trabajo desarrollado trata de campaña de tomografía eléctrica (ERT) y dos ensayos de penetración dinámica tipo Borros. Además, como complemento a la realización de los dos ensayos de campo antes citados, se realizan una serie de ensayos de laboratorio para muestras de suelo, tomando para ello un total de 5 muestras cada 20 cm para llegar a una profundidad total de 1 m.

Los ensayos de penetración dinámica nos proporcionan información del terreno en una sola dimensión (1D), en cambio, la tomografía eléctrica (ERT) permite tomar información del subsuelo en dos dimensiones (2D).

La campaña de prospección geofísica mediante tomografía eléctrica (ERT) ha permitido definir la variación de resistividad eléctrica tanto en profundidad como lateralmente en el subsuelo, y por lo tanto, poder extrapolar los resultados de los ensayos de penetración dinámica a otros puntos de la parcela.

Los ensayos de laboratorio realizados han consistido en: determinación de la humedad de las muestras, determinación de los límites de Atterberg, análisis granulométrico y determinación de la expansividad del suelo mediante equipo Lambe.

Con los valores obtenidos en los ensayos, y tomando como referencia el documento de seguridad y cimientos, se ha concluido que, para una futura edificación en la parcela estudiada, el método de cimentación más apropiado será de tipo losa.

ABSTRACT

This final degree project analyses and characterises the terrain of a plot of land located in the ‘Los Almendros’ housing estate, in the municipality of Linares (Jaén). The work carried out involves an electrical tomography campaign (ERT) and two Borros-type dynamic penetration tests. In addition, as a complement to the two aforementioned field tests, a series of laboratory tests were carried out on soil samples, taking a total of 5 samples every 20 cm to reach a total depth of 1 m.

The dynamic penetration tests provide us with information about the ground in one dimension (1D), while the electrical tomography (ERT) allows us to take information about the subsoil in two dimensions (2D).

The geophysical prospecting campaign using electrical tomography (ERT) has made it possible to define the variation in electrical resistivity both at depth and laterally in the subsoil, and therefore to extrapolate the results of the dynamic penetration tests to other points in the plot.

The laboratory tests carried out consisted of: determination of the humidity of the samples, determination of the Atterberg limits, granulometric analysis and determination of the expansivity of the soil using Lambe equipment.

With the values obtained in the tests, and taking the safety and foundations document as a reference, it has been concluded that, for a future building on the plot studied, the most appropriate foundation method will be slab foundations.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los métodos geotécnicos y geofísicos son técnicas de exploración geológica que se utilizan para estudiar la distribución de las propiedades del subsuelo. En el caso de los métodos geofísicos, se basan en la medición de la resistividad eléctrica del terreno, que puede variar en función de la composición y la estructura del subsuelo. Algunas de las técnicas geo-eléctricas más comunes, como es el caso de la tomografía eléctrica, miden la resistividad eléctrica y la polarización inducida en el subsuelo. Estas técnicas son utilizadas en la prospección de recursos naturales, la detección de acuíferos subterráneos, el estudio de fallas geológicas y la evaluación de la contaminación del suelo, entre otros usos.

Es muy importante realizar una buena caracterización del suelo para poder prever su comportamiento a la hora de realizar cualquier tipo de obra, ya sea en el ámbito civil, minero, industrial o para edificación, sobre todo a la hora de proyectar cimentaciones, debido a que nos permite definir la capacidad de carga del suelo, su capacidad de drenaje, compresibilidad y otros factores que son de suma importancia para diseñar cimentaciones seguras.

Gracias a la caracterización del suelo, podremos determinar qué tipo de cimentación es la más adecuada para un proyecto específico, lo que es crucial para la estabilidad y durabilidad de las estructuras construidas sobre el terreno.

OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo fin de grado (TFG), realizado bajo la modalidad de trabajo experimental, es el estudio de las características georresistentes de una parcela de terreno ubicada en la urbanización “Los Almendros”, localizada en el término municipal de Linares (Jaén).

Para alcanzar este objetivo principal, se han planteado como objetivos específicos el desarrollo de una serie de mediciones y análisis, empleando técnicas directas e indirectas, acompañadas de ensayos de laboratorio y del correspondiente trabajo de gabinete. Los ensayos realizados para tal fin han sido:

- Campaña geofísica mediante tomografía eléctrica (ERT).
- Ensayo de penetración dinámica tipo Borros.
- Ensayos de laboratorio de suelos: determinación de la humedad, determinación de los límites de Atterberg, análisis granulométrico y determinación de la expansividad del suelo mediante equipo Lambe.

Así, la tomografía eléctrica permitirá definir la resistividad eléctrica tanto en profundidad como lateralmente a lo largo de un perfil, pudiendo de esta forma extrapolar los resultados del ensayo de penetración dinámica a lo largo de este perfil. Esta correlación va a concluir si los resultados del ensayo de penetración dinámica son representativos en otros puntos de la parcela.

Atendiendo a los resultados de todos los ensayos y siguiendo la normativa correspondiente, se podrá definir el tipo de terreno y el tipo de resistencia de este, para su futuro desarrollo constructivo. En este caso, para poder definir la mejor opción para la edificación, se aplicará el documento básico de seguridad estructural de cimientos.

BLOQUE I. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. Introducción a las técnicas de Prospección Geofísica.

Las técnicas de prospección geofísica son métodos utilizados para estudiar las propiedades físicas del subsuelo y obtener información sobre la composición, la estructura y otras características geológicas y geotécnicas de la Tierra. Estas técnicas son ampliamente utilizadas en la exploración de recursos naturales, la ingeniería civil, la arqueología, la geología ambiental y la evaluación de riesgos geotécnicos. Algunas de las técnicas de prospección geofísica más comunes incluyen la sísmica, la resistividad eléctrica, la electromagnética, el radar de penetración en el suelo (GPR), la gravimetría y la magnetometría.

La prospección sísmica es una técnica que utiliza ondas sísmicas generadas artificialmente (mediante explosiones controladas o martilleo) o naturalmente (terremotos) para estudiar las capas del subsuelo. Al registrar el tiempo que tardan las ondas en viajar a través de diferentes materiales, es posible determinar la estructura y las propiedades de los estratos subterráneos.

La resistividad eléctrica mide la capacidad de un material para resistir el flujo de corriente eléctrica. Esta técnica se utiliza para detectar variaciones en la resistividad del subsuelo, lo que puede indicar cambios en la composición y la presencia de agua subterránea, minerales o cavidades.

La prospección electromagnética se basa en la generación de campos electromagnéticos en el subsuelo y la medición de las respuestas para detectar variaciones en la conductividad eléctrica. Esta técnica es útil para localizar estructuras metálicas, tuberías enterradas, depósitos minerales y agua subterránea.

El radar de penetración en el suelo (GPR) utiliza pulsos de ondas electromagnéticas de alta frecuencia para detectar cambios en las propiedades del subsuelo. Es especialmente útil para localizar objetos enterrados, como tuberías, cimientos, restos arqueológicos y capas geológicas.

La gravimetría se basa en medir las variaciones en la aceleración gravitatoria terrestre para inferir la distribución de densidades en el subsuelo. Esta técnica es valiosa para identificar estructuras geológicas, como fallas, pliegues y cuerpos intrusivos.

La magnetometría mide las variaciones en el campo magnético terrestre para identificar anomalías magnéticas asociadas con minerales, rocas ígneas, estructuras geológicas y artefactos arqueológicos.

Estas técnicas de prospección geofísica proporcionan información detallada sobre las características del subsuelo sin necesidad de excavar o perforar, lo que las hace fundamentales para una amplia gama de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ingeniería y exploración de recursos naturales (Garga, V., 2011).

1.1.1. Métodos de Prospección Geofísica.

Se dividen en dos tipos:

a) Corriente directas o inyección de corriente:

- a.1. Sondeo eléctrico vertical (SEV).
- a.2.- Calicata eléctrica (CE).
- a.3.- Polarización inducida (PI).
- a.4.- Georradar.
- a.5.- Misa a la masse.

b) Corriente indirecta o de campo de corriente natural:

- b.1.- Potencial espontaneo (PI).
- b.2.- Corrientes telúricas.
- b.3.- Corrientes magnetotelúricas.

a.1.- Sondeos eléctricos verticales (SEV): Se realiza para conocer la distribución de resistividad aparente del suelo, gracias a eso conoceremos la distribución aparente del suelo.

Los resultados de los SEV (fig.1) es una curva que relaciona la separación de los electrodos con los que hemos realizado el ensayo con la resistividad correspondiente nada más obtenidos las curvas con los ábacos y programas correspondientes se podrá estimar la profundidad de los contactos geo eléctricos y establecer la secuencia de resistividades en vertical (Zienkiewicz, O.C., &Taylor, R.L.,2000).

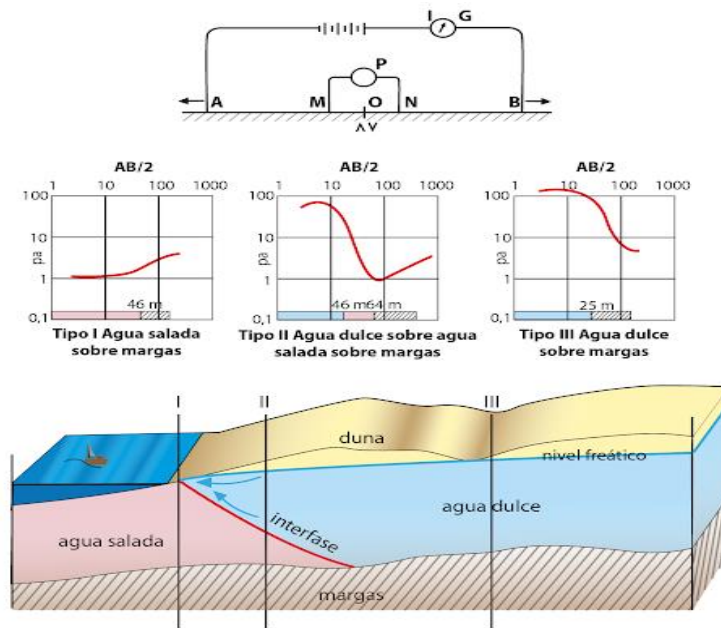


Figura 1. Ejemplo de la forma de medición y obtención de resultados en SEV. Fuente: Trabajo “importancia de los registros geofísicos” de Jesús Mendoza-Schlumberger.

a.2.- Calicatas eléctricas (CE): Son investigaciones horizontales del suelo a profundidad constante, se realiza la toma de muestras con el arreglo electrónico fijo, siguiendo perfiles con la configuración electrónica perpendicular, en cada punto de toma de muestra se obtiene un valor de la resistividad que luego usaremos para confeccionar las curvas de isorresistivas.

a.3.- Polarización inducida (PI): Se basa en la medición del decaimiento de la diferencia de potencial después de haber finalizado la introducción de corriente al terreno, en la (fig.2) se puede observar un ejemplo de la obtención de datos.

Para realizar la medición de las resistividades se usa un equipamiento muy similar a lo de las Calicatas Eléctricas y de los Sondeos Eléctricos Verticales.

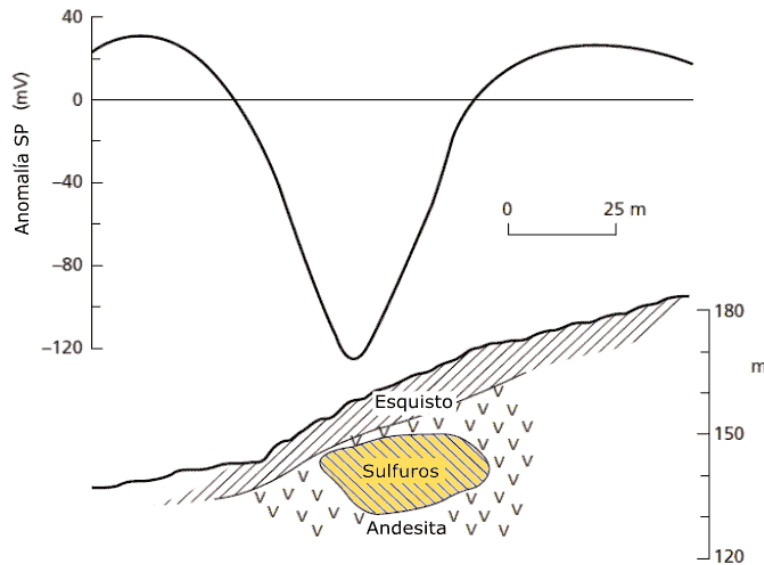


Figura 2. Obtención de datos anómalos por el método de PI. Fuente: PROGEO (empresa), métodos eléctricos

a.4. Georradar: Es un método no destructivo cuya función es la de detectar estratos enterrados con alta precisión, obteniéndose mapas detallados del subsuelo (fig.3).

Es usada para investigaciones de poca profundidad, se basa en la emisión al terreno de pulsos electromagnéticos de escasa duración mediante una antena apantallada de frecuencia variable (entre 25 MHz y 2 GHz) en función de la profundidad a la que queramos investigar (Solana Capolla, M. 2014).

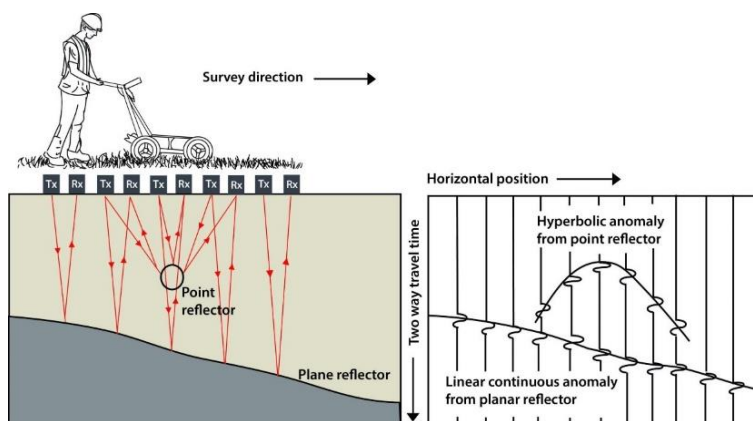


Figura 3. Aparataje para el método de Georradar y forma de medición. Fuente: Google: GPR3D, método georradar

a.5.- Mise a la masse: también denotado como cuerpo cargado o de excitación de la masa, nos permite comprobar la dimensión del afloramiento de un mineral (si es pequeño, local o extenso).

Se trabaja como en el método de equipotenciales.

Se basa en realizar una especie de sondeo y conectar uno de los electrodos que envían potencia al interior y conectarlo con el cuerpo de interés eso hará que utilicemos el cuerpo geológico o yacimiento como una especie de amplificador que permite expandir las ondas de corriente que enviamos y el resultado será leer la forma de las ondas con figura del cuerpo analizado, en la (fig.4) se visualiza una ilustración sobre cómo se efectúa la toma de datos en este método.

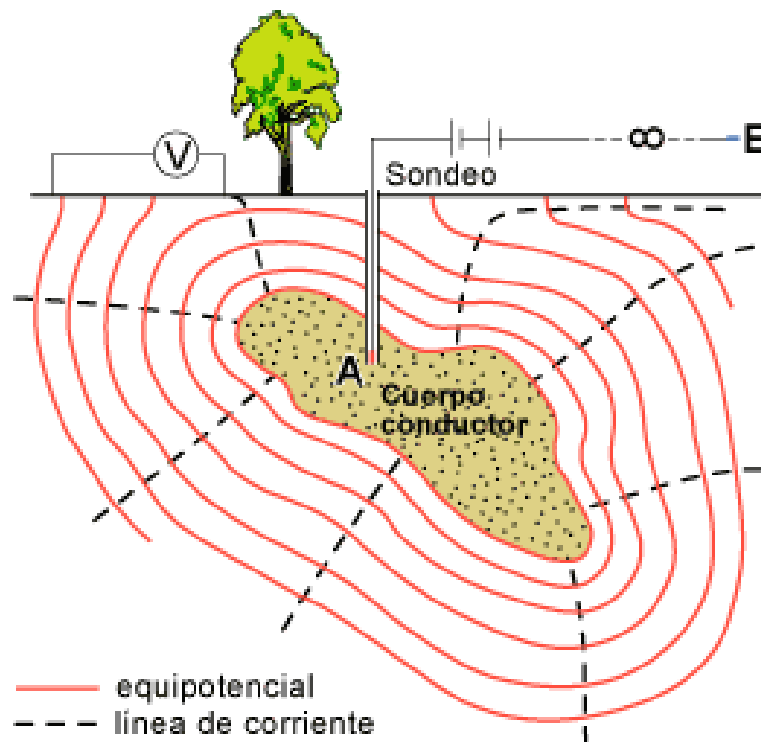


Figura 4. Forma de medición. Fuente: página web: <https://www-ig.unil.ch/geophyse/pro18e.htm>

b.1.-Potencial espontaneo (PE): El agua subterránea es el principal responsable de la existencia del potencial espontaneo gracias a que actúa como un electrolito disolviendo y llevando minerales al estado iónico.

Si fundamento se basa en que las reacciones químicas y efectos de contacto que pasan en suelos de distinta naturaleza en otras palabras, se generan corrientes debida a la oxidación y reducción de un mineral, al oxidarse una se carga positivamente y al reducirse se carga negativamente el mineral constituyendo una “pila” así es justo como se origina la corriente electrolítica, su mayor utilidad radica en la identificación de yacimientos minerales (Ladd, C. C.,1991).

b.2.- Corrientes telúricas: Las corrientes telúricas son corrientes eléctricas naturales que fluyen en la Tierra y se generan debido a la actividad geológica. Estas corrientes se producen por la interacción entre el núcleo de hierro fundido de la Tierra y su corteza exterior. Se cree que las corrientes telúricas pueden ser influenciadas por factores como la composición del suelo, la actividad tectónica y la presencia de agua subterránea. La metodología para estudiar las corrientes telúricas involucra el uso de instrumentos especializados, como magnetómetros y electrodos, para medir la intensidad y la dirección de las corrientes. Los estudios de campo suelen implicar la realización de mediciones en diferentes ubicaciones para mapear la distribución de las corrientes telúricas en una determinada área.

b.3.- Corrientes magnetotelúricas: Las corrientes magnetotelúricas son corrientes eléctricas naturales que se generan en la Tierra como resultado de la interacción entre campos magnéticos y corrientes eléctricas en su interior. Estas corrientes se producen debido a la conductividad eléctrica de materiales como rocas, minerales y fluidos en la corteza terrestre y el manto superior. La variación del campo magnético terrestre induce corrientes eléctricas en la Tierra, y estas corrientes generan un campo eléctrico que se puede medir en la superficie. Las mediciones de las corrientes magnetotelúricas se utilizan en geofísica para estudiar la estructura y la composición de la corteza terrestre, así como para investigar procesos geodinámicos como la actividad volcánica y la tectónica de placas, en la (fig.5) se observa como se realiza la medición.

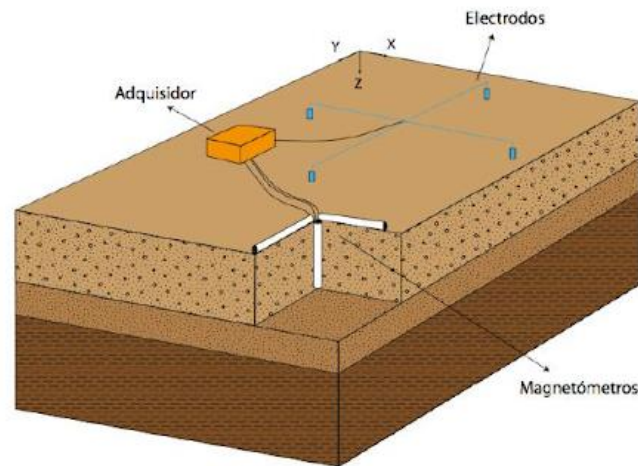


Figura 5. Forma de obtención de muestras. Fuente: geodatos.cl, método magnetotelúrico

1.2. Tomografía eléctrica (ERT).

La tomografía eléctrica es una técnica de prospección geofísica que se utiliza para investigar las propiedades del subsuelo. Esta técnica se basa en la medición de la resistividad eléctrica del suelo para crear imágenes tridimensionales que representan la distribución de las propiedades eléctricas en el subsuelo. La resistividad eléctrica es la capacidad de un material para resistir el flujo de corriente eléctrica, y varía dependiendo de la composición y la saturación de agua del suelo, así como de la presencia de minerales, fracturas u otras estructuras geológicas.

La tomografía eléctrica implica la colocación de electrodos en la superficie del terreno, a través de los cuales se inyecta una corriente eléctrica controlada. Luego, se miden las diferencias de potencial resultantes entre diferentes combinaciones de electrodos. Estas mediciones se utilizan para calcular la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, lo que proporciona información sobre la estructura y las características geológicas del área estudiada.

Es una herramienta valiosa en la exploración geofísica debido a su capacidad para proporcionar imágenes detalladas del subsuelo a diferentes profundidades. Esta técnica se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la exploración de recursos naturales, la ingeniería civil, la hidrogeología, la arqueología y la evaluación ambiental.

A continuación, se describen algunas de las aplicaciones más comunes de la tomografía eléctrica:

a) Exploración de recursos naturales: La tomografía eléctrica se utiliza para mapear y caracterizar depósitos minerales, yacimientos de agua subterránea, yacimientos de petróleo y gas, así como para identificar estructuras geológicas que pueden albergar recursos naturales.

b) Ingeniería civil: En proyectos de construcción e infraestructura, la tomografía eléctrica se utiliza para evaluar la estabilidad del suelo, identificar cavidades subterráneas, detectar la presencia de agua subterránea y caracterizar las propiedades geotécnicas del subsuelo.

c) Hidrogeología: La tomografía eléctrica es una herramienta eficaz para mapear acuíferos, determinar la distribución de la saturación de agua en el subsuelo, identificar zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas, y evaluar la calidad del agua subterránea.

d) Arqueología: En estudios arqueológicos, la tomografía eléctrica se utiliza para detectar estructuras enterradas, como cimientos, muros y restos arqueológicos, sin necesidad de excavar el sitio.

e) Evaluación ambiental: En aplicaciones ambientales, la tomografía eléctrica se utiliza para investigar la contaminación del suelo y del agua subterránea, así como para monitorear la migración de contaminantes en el subsuelo.

La tomografía eléctrica proporciona información detallada sobre la distribución espacial de las propiedades del subsuelo, lo que permite a los investigadores y profesionales obtener una comprensión más completa de las características geológicas y geotécnicas de un área determinada. Esta información es fundamental para la toma de decisiones en una variedad de campos, incluyendo la planificación de proyectos de construcción, la gestión de recursos naturales y la conservación del medio ambiente.

En resumen, la tomografía eléctrica es una técnica poderosa y versátil que se utiliza para investigar las propiedades del subsuelo en una amplia gama de aplicaciones. Al proporcionar imágenes detalladas de la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, esta técnica permite a los investigadores y profesionales obtener información

crucial sobre la composición, la estructura y otras características geológicas y geotécnicas del subsuelo.

- Fundamentos y descripción del método:

Se basa en la inyección de corriente eléctrica al terreno a través de electrodos colocados en una configuración específica (Wenner-Schlumberger) y gracias a los datos de las diferencias de resistividades podremos caracterizar el terreno.

- Descripción del equipo:

El equipo de campo más usado está diseñado para corrientes continuas artificiales. La corriente generada por una batería se transmite a través de cables aislados dispuestos sobre el suelo, y en sus extremos se conectan a electrodos (varillas de cobre o acero) que se clavan para cerrar el circuito eléctrico. Con otros dos electrodos independientes se mide la tensión resultante a través de un voltímetro, ver en (fig.6).

Para que circule la corriente necesitamos cerrar un circuito, es decir que la corriente sea introducida en un punto A mediante un electrodo de corriente, circule por el material y salga por otro electrodo en el punto B. Como el voltímetro mide diferencia de tensión o de potencial, necesitamos conectarlo en dos puntos M y N mediante dos electrodos de potencial. Es decir que midiendo I con un AMPERÍMETRO y DV con un VOLTÍMETRO, además de conocida la posición de los puntos A, B, M y N, podremos determinar el valor de la resistividad r . Por lo tanto, es conocida como la constante electrónica que depende de la configuración de los electrodos. La resistividad en función de la k se denomina aparente.

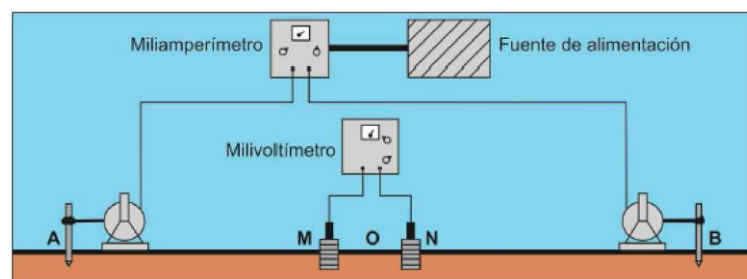


Figura 6. Configuración para medir. Fuente: Universidad Nacional de Tucumán, gravimetría mediciones e interpretación.

- Metodología de adquisición de datos en campo:

Se basa en el registro de las medidas del potencial eléctrico que pasan por dos electrodos (de potencial) al introducir corriente eléctrica por otros dos electrodos los cuales son denominados electrodos eléctricos, se usan los electrodos de corriente (para inducir corriente al terreno), los electrodos de potencial (para medir la diferencia de potencial existente) y un sistema de adquisición de datos (para registrar las medidas).

Una vez datados los valores del potencial eléctrico y la de la corriente inducida al terreno y conociendo su configuración (imágenes de abajo) y disposición geométrica(K) se establecerá el valor de la resistencia aparente que viene dada por (imagen con referencia Everret,2013).

$$Pa = \frac{\Delta V}{I} \times K$$

Ecuación 1. Fórmula de la resistividad aparente

El valor obtenido de resistividad será atribuido a un determinado punto geométrico del suelo cual profundidad y posición en el perfil será dependiente del posicionamiento de dicho cuadripolo y la separación que haya entre ellos. Estos valores de resistividad aparente proporcionan la estructura eléctrica que tenemos en el subsuelo que relacionara el tipo de geología o fluidos presentes en la zona de estudio.

- Tratamiento e inversión de datos:

Existen distintos tipos de arreglos o disposiciones electrónicas diseñadas con un k diferente:

Configuración SCHLUMBERGER.

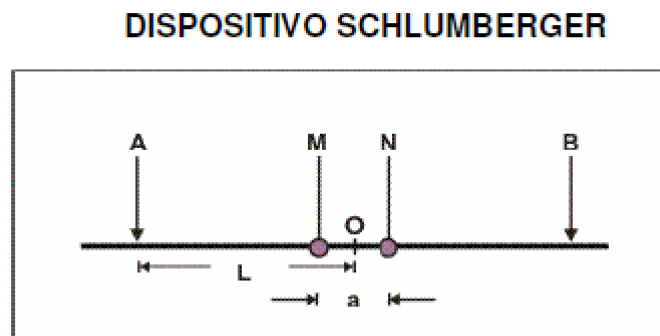


Figura 7. Configuración del dispositivo SCHLUMBERGER

Es un dispositivo simétrico que contiene 2 electrodos de medida y 2 de envío de intensidad.

Los valores de resistividad aparente se representan en función de $AB/2$.

Y la constante geométrica es:

$$K = \frac{\pi}{4MN} (AB^2 - MN^2) \approx \frac{\pi x L^2}{a}$$

Ecuación 2. Fórmula de la constante geométrica

Configuración WENNER.

También es un dispositivo simétrico pero los elementos se mantienen equiespaciados.

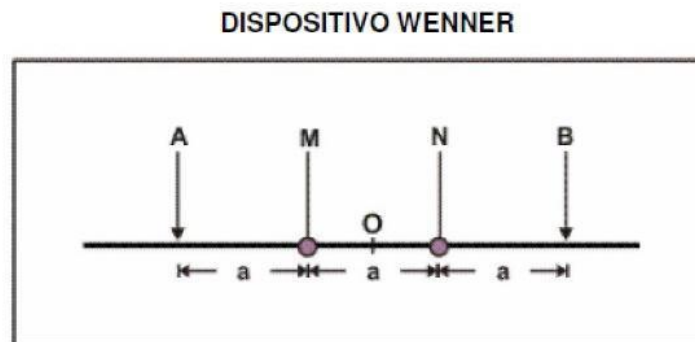


Figura 8. Configuración del dispositivo WENNER

La constante geométrica es:

$$K = 2\pi a$$

Ecuación 3. Fórmula de la constante geométrica

Configuración LEE.

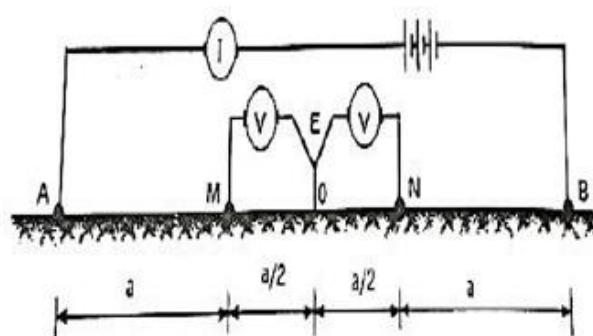


Figura 9. Configuración del dispositivo LEE

El factor geométrico es:

$$K = 6\pi a$$

Ecuación 4. Fórmula del factor geométrico

La resistividad:

$$\rho = 6\pi a \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$$

Ecuación 5. Fórmula para el cálculo de la resistividad

Tengamos en cuenta que: $AM=MN=NB=a$

Al momento de dibujar las curvas se realizarán dos curvas de resistividad en función de “a”, la obtenida después de la lectura de ME y la obtenida leyendo en EN.

Es un dispositivo parecido al Wenner, la diferencia es que añade un electrodo extra de medida entre M y N para tener mayor precisión, no suele ser tan común.

Se ha de recalcar que el método Lee por regla general no se usa.

- Métodos de Resistividad:

El método de resistividad en geofísica es una técnica utilizada para investigar las propiedades del subsuelo mediante la medición de la resistividad eléctrica de los materiales que se encuentran debajo de la superficie terrestre. Esta técnica se basa en el principio de que diferentes materiales tienen diferentes capacidades para conducir corriente eléctrica, lo que se conoce como resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica es una medida de la oposición de un material al flujo de corriente eléctrica, y varía en función de la composición, la porosidad, la saturación de agua y otras características del suelo y las rocas.

Implica la colocación de electrodos en la superficie del terreno, a través de los cuales se inyecta una corriente eléctrica controlada. Esta corriente se propaga a través del subsuelo y genera un campo eléctrico. Luego, se miden las diferencias de potencial resultantes entre diferentes combinaciones de electrodos. Estas mediciones se utilizan para calcular la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo.

Existen diferentes configuraciones de electrodos que se utilizan en el método de resistividad, como el arreglo dipolo-dipolo, el arreglo Wenner, el arreglo Schlumberger, entre otros. Cada configuración tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la elección de

la configuración adecuada depende de las características del sitio y los objetivos del estudio (Cernica, J. N.,1995).

Una vez que se han recopilado los datos de resistividad eléctrica, se utilizan algoritmos de inversión para procesar esta información y crear perfiles o imágenes que representan la distribución de la resistividad en el subsuelo. Estos perfiles muestran variaciones en la resistividad a diferentes profundidades y ubicaciones, lo que proporciona información sobre la estructura geológica, la presencia de agua subterránea, la contaminación del suelo, entre otros aspectos.

El método de resistividad eléctrica se utiliza en una amplia gama de aplicaciones en geofísica y exploración del subsuelo. Algunas de las aplicaciones incluyen:

- Exploración de recursos naturales: La resistividad eléctrica se utiliza para mapear caracterizar depósitos minerales, yacimientos de agua subterránea, yacimientos de petróleo y gas, así como para identificar estructuras geológicas que pueden albergar recursos naturales.

- Ingeniería civil: En proyectos de construcción e infraestructura, la resistividad eléctrica se utiliza para evaluar la estabilidad del suelo, identificar cavidades subterráneas, caracterizar el subsuelo para cimentación y estudiar la distribución de la humedad.

- Hidrogeología: La resistividad eléctrica se utiliza para mapear acuíferos, estudiar la interacción entre aguas subterráneas y superficiales, y caracterizar la calidad del agua subterránea.

- Evaluación ambiental: La resistividad eléctrica se utiliza para detectar contaminantes en el suelo y el agua subterránea, así como para estudiar la migración de contaminantes en el subsuelo.

En resumen, el método de resistividad eléctrica es una herramienta valiosa en geofísica que proporciona información detallada sobre las propiedades del subsuelo, lo que es fundamental para una amplia gama de aplicaciones en exploración del subsuelo, ingeniería civil, hidrogeología y evaluación ambiental.

1.3. Ensayos geotécnicos.

Los ensayos geotécnicos son pruebas y estudios realizados para evaluar las propiedades mecánicas, físicas, hidráulicas y químicas de los suelos y rocas en el contexto de proyectos de ingeniería civil, geotécnica o de construcción. Estos ensayos proporcionan información crucial para el diseño de cimentaciones, terraplenes, taludes, muros de contención y otros elementos estructurales, así como para la evaluación de la estabilidad del suelo, la capacidad de carga, la compactación y la permeabilidad. Los ensayos geotécnicos incluyen pruebas de laboratorio y pruebas de campo que permiten caracterizar y comprender el comportamiento del suelo en diferentes condiciones y bajo diferentes cargas.

1.3.1. Introducción a la geotecnia.

La geotecnia es una disciplina de la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades y comportamiento de los suelos y rocas, así como de su interacción con las estructuras construidas sobre ellos. Esta área de estudio es fundamental para el diseño de cimentaciones, terraplenes, muros de contención y otros elementos estructurales, ya que permite comprender cómo el suelo afecta la estabilidad y el rendimiento de las construcciones. La geotecnia también abarca aspectos como la evaluación de la capacidad de carga del suelo, la compactación, la permeabilidad y la prevención de riesgos geotécnicos.

1.3.2. Propiedades de los suelos.

Las propiedades del suelo son características físicas, químicas y biológicas que influyen en su calidad y capacidad para sustentar el crecimiento de plantas y otros organismos. Estas propiedades son fundamentales para la productividad agrícola, la conservación del medio ambiente y la salud de los ecosistemas. A continuación, se describen algunas de las propiedades más importantes del suelo:

- Textura: La textura del suelo se refiere al tamaño de las partículas que lo componen. Los suelos se clasifican en arcillosos, limosos y arenosos, dependiendo de la

proporción de partículas de arcilla, limo y arena que contienen. La textura del suelo influye en la capacidad de retención de agua, aireación y facilidad de cultivo.

- Estructura: La estructura del suelo se refiere a la disposición de las partículas individuales en agregados más grandes. Una buena estructura del suelo favorece la infiltración del agua, la circulación del aire y el crecimiento de las raíces de las plantas.

- Porosidad: La porosidad del suelo se refiere al espacio poroso entre las partículas del suelo. Los poros permiten la circulación de agua, aire y nutrientes en el suelo, lo que es esencial para el crecimiento de las plantas.

- Capacidad de retención de agua: La capacidad de retención de agua del suelo se refiere a la cantidad de agua que puede retener en sus poros. Esta propiedad es crucial para mantener la disponibilidad de agua para las plantas durante períodos secos.

- pH del suelo: El pH del suelo indica si es ácido, neutro o alcalino. El pH del suelo afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas, ya que influye en la solubilidad de los minerales presentes en el suelo.

- Materia orgánica: La materia orgánica en el suelo proviene de restos de plantas y animales descompuestos. La materia orgánica mejora la estructura del suelo, aumenta su capacidad de retención de agua y nutrientes, y proporciona nutrientes esenciales para las plantas.

- Nutrientes del suelo: Los nutrientes del suelo, como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y muchos otros, son fundamentales para el crecimiento de las plantas. La disponibilidad de estos nutrientes en el suelo influye en la salud y productividad de los cultivos.

- Actividad biológica: Los microorganismos presentes en el suelo desempeñan un papel crucial en la descomposición de la materia orgánica, la ciclación de nutrientes y la formación de agregados estables en el suelo.

Estas son solo algunas de las propiedades del suelo que influyen en su calidad y capacidad para sustentar la vida vegetal y animal (fig.10). Es importante comprender estas propiedades para manejar adecuadamente los suelos, conservar su fertilidad y proteger el medio ambiente (Brady & Weil, 2010).



Figura 10. Resumen de las propiedades del suelo

1.3.3. Fundamento y descripción teórica de ensayos.

A continuación, se indica el fundamento y la descripción teórica de los diferentes ensayos geotécnicos utilizados en la presente investigación, tomando como referencia la normativa actualizada para cada uno de ellos.

1.3.3.1. Ensayos in situ. Ensayo de penetración dinámica tipo Borros (ISO 22476-2:2005).

El ensayo de penetración dinámica es utilizado para la determinación de la resistencia in situ de suelos y rocas blandas a la penetración de una puntaza cónica. Para llevar a cabo dicha penetración de la puntaza, se utiliza una maza de masa conocida y con caída libre desde una altura determinada, mediante golpeo, y se definiría la resistencia a la penetración con el valor del número de golpes que se necesitan para hincar la puntaza cónica a una longitud específica en el suelo. Así, se realiza un registro continuo del número de golpes en función de la profundidad. En este caso, no se recuperan muestras de terreno al finalizar la penetración.

Se consideran cuatro tipos de procedimientos, cada uno con características específicas, que cubren un intervalo amplio de trabajo específico por golpe:

- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL): representa la parte más baja del intervalo de masa de los equipos dinámicos.

- Ensayo de penetración dinámica mediana (DPM): representa la porción de masa media de los equipos dinámicos.

- Ensayos de penetración dinámica pesada (DPH): representa la porción de masa media a muy pesado de los equipos dinámicos.

- Ensayo de penetración dinámica super pesada (DPSH): representa la parte del extremo más alto de la porción de masa de los equipos dinámicos.

Equipo utilizado:

Para realizar este ensayo, es necesario disponer de un dispositivo de hinca, el cual debe cumplir:

- La masa debe ser guiada durante el proceso de vida para asegurar que la resistencia sea mínima.

- El mecanismo de liberación nos debe de asegurar una caída libre constante.

- La cabeza de impacto de acero debe estar conectada a la parte superior de las barras de hinca.

- Debe formar parte del dispositivo de hinca una guía soporte para darnos la seguridad sobre la verticalidad y el soporte lateral del tramo del varillaje que sobresale del terreno.

Cabeza de impacto:

Debe ser fabricada con acero de alta resistencia. Podría ser colocado un amortiguador entre la maza y la cabeza de impacto.

Puntaza cónica:

Debe ostentar un ángulo de 90° en el vértice una camisa de prolongación superior y un tramo de transición hasta las barras de hinca de prolongación.

Pueden ser de dos formas:

- Recuperables (fija): el extremo de la barra de hinca debe encajar sin holgura en la puntaza.

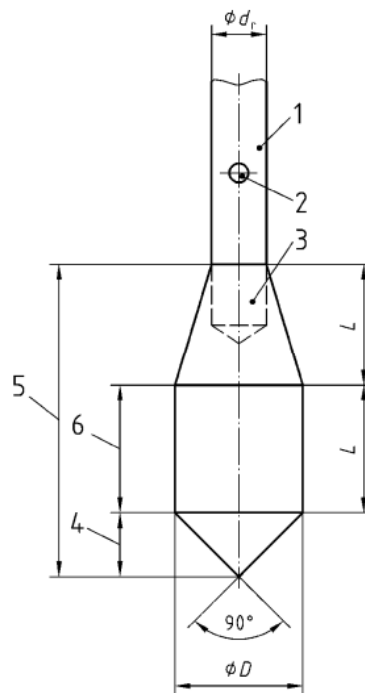


Figura 11. Puntaza tipo fija para ensayo de penetración dinámica

- Desechables (perdida).

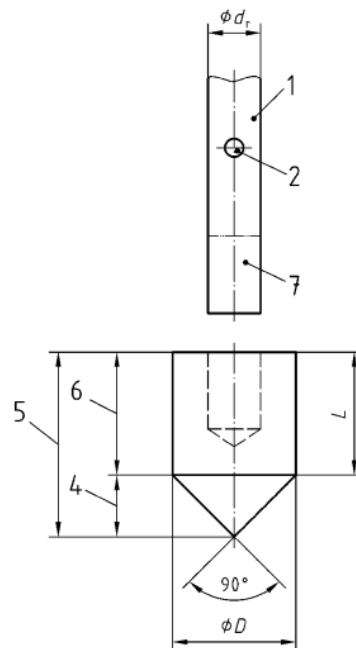


Figura 12. Puntaza tipo perdida para ensayo de penetración dinámica

Donde:

1 barra de hincia de prolongación.

2 agujero de inyección (opcional).

3 montaje a rosca.

4 punta del cono.

5 Puntaza.

6 camiseta cilíndrica.

7 montaje por penetración.

L Longitud de la camisa cilíndrica.

D Diámetro de la base.

“ d_r ” Diámetro de la barra.

Barras de hinca:

Se debe realizar con acero de alta resistencia apropiadas al trabajo sin deformaciones ni desgastes excesivos.

Deben ser de junta lisa, estar rectas. Las deformaciones deben ser fáciles de corregir, la deflexión no debe superar una unidad de medida en 1000 (1mm en 1 m), se deben usar barras huecas.

Dispositivo para medir el par de torsión:

El aparato debería ser capaz de medir un par de torsión de al menos 200 Nm y debe graduarse para leer al menos incrementos de 5 Nm.

Es posible el uso de un sensor para el buen registro del par de torsión.

Se puede usar equipos opcionales como:

- Contador de golpes.
- Dispositivo para medir la longitud de penetración.
- Sistema de inyección.
- Aparato para la medición de las dimensiones de la puntaza.
- Dispositivo para controlar la desviación del varillaje respecto de la vertical.

Tabla 1. Dimensiones y masas de los cuatro tipos de aparatos para ensayos de penetración dinámica. Fuente: normativa AENOR

Aparato para ensayos de penetración dinámica	Símbolo	Unidad	DPL (ligero)	DPM (mediano)	DPH (pesado)	DPSH (súper pesado)	
						DPSH-A	DPSH-B
Dispositivo de hincas masa de la maza, nueva altura de caída	m h	kg mm	$10 \pm 0,1$ 500 ± 10	$30 \pm 0,3$ 500 ± 10	$50 \pm 0,5$ 500 ± 10	$63,5 \pm 0,5$ 500 ± 10	$63,5 \pm 0,5$ 750 ± 20
Cabeza de impacto diámetro masa (máx.) (barra guía incluida)	d m	mm kg	$50 < d < D_h^a$ 6	$50 < d < D_h^a$ 18	$50 < d < 0,5 D_h^a$ 18	$50 < d < 0,5 D_h$ 18	$50 < d < 0,5 D_h^a$ 30
Puntaza de 90° área nominal de la base diámetro de la base, nuevo diámetro de la base, gastada (mín.) longitud de la camisa cilíndrica longitud de la punta cónica desgaste máx. permisible de la punta	A D L	cm ² mm mm mm mm mm	10 $35,7 \pm 0,3$ 34 $35,7 \pm 1$ $17,9 \pm 0,1$ 3	15 $43,7 \pm 0,3$ 42 $43,7 \pm 1$ $21,9 \pm 0,1$ 4	15 $43,7 \pm 0,3$ 42 $43,7 \pm 1$ $21,9 \pm 0,1$ 4	16 $45,0 \pm 0,3$ 43 $90,0 \pm 2^b$ $22,5 \pm 0,1$ 5	20 $50,5 \pm 0,5$ 49 51 ± 2 $25,3 \pm 0,4$ 5
Barras de hincas ^c masa (máx.) diámetro exterior (máx.) desviación de la barra ^d : en los 5 m inferiores en el resto	m d_r	kg/m mm % %	3 22 0,1 0,2	6 32 0,1 0,2	6 32 0,1 0,2	6 32 0,1 0,2	8 35 0,1 0,2
Trabajo específico por golpe	mgh/A E_n	kJ/m ²	50	100	167	194	238
^a D_h : diámetro de la maza. En caso de forma rectangular, se asume la menor dimensión como equivalente al diámetro. ^b Puntaza desechable (perdida) solamente. ^c La longitud máxima de las barras no debe exceder de 2 m. ^d Desviación de la barra respecto de la vertical. NOTA Las tolerancias indicadas son las tolerancias de fabricación.							

Procedimiento de ensayo:

- Verificación del equipo y calibraciones:

Se deben realizar las verificaciones de las dimensiones antes de realizar el ensayo y que se adecuen a las de la tabla, igual también se deben verificar la rectitud tras cambiar de emplazamiento cada 20 ensayos y después de cada uno de los ensayos.

- Preparación del ensayo:

El equipo debe posicionarse con el penetrómetro vertical buscando que no haya desplazamiento durante el procedimiento o ensayo, el equipo debe estar posicionado a una distancia tal que no afecte a estructuras, pilones, sondeos etc., para asegurarnos que no influyan en el ensayo.

En el caso de que realicemos ensayos con barras que puedan moverse por ejemplo sobre el agua etc., estas serán sujetadas por apoyos de bajo rozamiento con una separación de no más de 2 m entre sí.

- Ejecución del ensayo:

Las barras deben ser hincadas verticalmente y sin que haya mucha inclinación en la parte de la barra de extensión que sobresale del terreno. No es recomendable aplicar carga sobre la cabeza de impacto ni a las barras durante el proceso de elevamiento de la maza.

Se requiere mantener la velocidad del hincado del penetrómetro entre 15 y 30 golpes/minuto y deben ser registradas todas las interrupciones superiores a 5 minutos.

Durante el hincado se debe rotar la barra 1,5 vueltas cada 50 golpes para así ajustar las conexiones entre ellas.

Se inyecta agua o lodo a través de agujeros horizontales o inclinados para reducir el rozamiento superficial de la barra. En algunos casos se usarán tuberías de revestimiento con el mismo propósito.

Es necesario el registro del número de golpes de cada 100 mm de penetración en el caso del DPL, del DPM y del DPH y cada 100 mm/200 mm en los casos del DPSH-A y DPSH-B.

Los intervalos, atendiendo a los golpes, ira de la siguiente manera:

$N_{10} = 3$ y 50 para DPL, DPH y DPM

$N_{20} = 5$ y 100 para DPSH-A y DPSH-B

Por regla general es necesaria la detención del ensayo cuando el número de golpes sobrepasa dos veces los valores máximos citados con anterioridad o si pasa del valor mínimo continuamente durante 1 m de penetración.

- Factores que influyen:

Los factores geotécnicos o que tienen cierta relación con el equipo pueden influir tanto en la selección y operación del equipo como en los resultados de los ensayos.

Requisitos de seguridad.

Salud personal y equipo de seguridad.

Aire limpio si se tienen que trabajar en espacios confinados.

Asegurar la seguridad del equipamiento.

Resultados de los ensayos:

Deben ser registrados e interpretados los resultados atendiendo a los índices N_{10} para el DPL, DPM y DPH y N_{10} o N_{20} para el DPSH-A y DPSH-B.

Es necesaria la consideración de los índices N_{xy} registrados, del rozamiento en las barras a causa de la adherencia al suelo o de su pandeo

Resumen del perfil de un ensayo de penetración dinámica:

Lugar en el que está o lugar más cercano* a la localización del ensayo de penetración: _____

Coordenadas x, y, z : _____

Número de trabajo/cliente: _____

Nombre y situación del proyecto: _____

Contratista: _____ Operador del equipo: _____

Fecha del ensayo: _____

Tipo de ensayo de penetración dinámica*: DPL, DPM, DPH, DPSH-A, DPSH-B: _____

Equipo verificado y conforme con el apartado 5.1 de la Norma Europea EN ISO 22476-2; Si/No* en: _____

Esquema de campo (escala 1: ____/ sin escala)* con las investigaciones geotécnicas directas (por ejemplo, sondeos) representadas:							

Otros datos importantes: _____

Firma: _____

Nombre del operador a cargo: _____

Figura 13. Ejemplo de estadillo de campo con el esquema de las investigaciones geotécnicas realizadas

Registro de los valores medidos y de los resultados del ensayo de penetración dinámica:

Contratista:		Número de trabajo:		Recinto:					
Cliente/nombre del proyecto:									
Ensayo de penetración dinámica N°:					Fecha:				
Tipo de ensayo de penetración dinámica*: DPL, DPM, DPH, DPSH-A o DPSH-B:									
Puntaza perdida o fija*					Cabeza de impacto fija/suelta*				
Coordenadas x, y, z									
Profundidad; se añaden 10 m, 20 m ó 30 m (cuando la profundidad sea > 10 m): + m									
Profundidad	N_{10}/N_{20}^*	Profundidad	N_{10}/N_{20}^*	Profundidad	N_{10}/N_{20}^*	Profundidad	N_{10}/N_{20}^*	Profundidad	N_{10}/N_{20}^*
0,10		2,10		4,10		6,10		8,10	
0,20		2,20		4,20		6,20		8,20	
0,30		2,30		4,30		6,30		8,30	
0,40		2,40		4,40		6,40		8,40	
0,50		2,50		4,50		6,50		8,50	
0,60		2,60		4,60		6,60		8,60	
0,70		2,70		4,70		6,70		8,70	
0,80		2,80		4,80		6,80		8,80	
0,90		2,90		4,90		6,90		8,90	
1,00		3,00		5,00		7,00		9,00	
**	Nm	**	Nm	**	Nm	**	Nm	**	Nm
1,10		3,10		5,10		7,10		9,10	
1,20		3,20		5,20		7,20		9,20	
1,30		3,30		5,30		7,30		9,30	
1,40		3,40		5,40		7,40		9,40	
1,50		3,50		5,50		7,50		9,50	
1,60		3,60		5,60		7,60		9,60	
1,70		3,70		5,70		7,70		9,70	
1,80		3,80		5,80		7,80		9,80	
1,90		3,90		5,90		7,90		9,90	
2,00		4,00		6,00		8,00		10,00	
**		**		**		**		**	
* se tacha lo que no sea aplicable. ** par de torsión medido.									
Otros datos Nivel freático: m debajo del punto de partida Nombre y firma del operador a cargo:									

Figura 14. Ejemplo de registro de los valores obtenidos en el ensayo de penetración dinámica

Cálculo mediante carga admisible:

Para relacionar la resistencia dinámica en punta R_d con el número de golpes, existen diferentes fórmulas empíricas, pero la más conocida y utilizada es la de los holandeses, que da la resistencia dinámica mediante la expresión:

$$Rd = \frac{M^2 H}{Ae(M + P)}$$

Ecuación 6. Fórmula de la resistencia dinámica

Siendo:

Rd = Resistencia dinámica (kg/cm²).

M = Masa de la maza (kg).

P = Peso del varillaje, yunque y puntaza (kg).

A = Sección de la puntaza en (cm²).

e = Penetración por golpe 20/N₂₀.

H = Altura de caída de la maza.

Por este procedimiento se conoce con cierta aproximación los valores de la carga admisible $Q_a = R_d / 40$ en kg/cm² de los suelos granulares en función de la resistencia del terreno a la penetración en cm/golpe.

1.3.3.2. Ensayos en laboratorio.

1.3.3.2.1. Preparación de muestras para ensayos de suelos (UNE 103 1000:1995).

A continuación, se describen las diferentes formas de recepción y almacenamiento de las muestras en laboratorio para proceder a la realización de los diversos ensayos.

Procedimiento operatorio:

Recepción de la muestra: al llegar al laboratorio se deben hacer constar los siguientes datos:

- Fecha de entrada.
- Número de referencia.
- Datos identificativos del peticionario (Nombre y dirección).
- Tipo de muestra y en qué estado llega.
- Procedencia e identificación de la muestra.

- Ensayos por realizar.

Almacenamiento de muestras: si se tratan de muestras alteradas debe disponer el laboratorio de un recinto cerrado donde se puedan almacenar dichas muestras. En el caso de ser muestras inalteradas, este recinto debería ser una cámara húmeda para evitar las variaciones de humedad de esta.

Preparación de la muestra: cuando se traten de muestras inalteradas, ésta será especificada en la norma correspondiente al ensayo.

En los que se requiere un secado previo se actuara de la siguiente manera:

- Se secará la muestra a estufa o por medio de secadores con circulación de aire frio o caliente menor siempre a 60 °C hasta que sea posible que se deshaga con un mazo de goma.

- Se seca al aire extendida.

Una vez secada se desmenuza los materiales que se hayan compactado a mediación de un mortero o un mazo de goma.

Realización del cuarteo de una muestra: se divide la muestra en dos porciones equitativas o lo más cercano a la equidad y se repite la misma operación con una de las porciones hasta obtener la cantidad de suelo que se necesita. El suelo que sobre es guardado debidamente etiquetado.

División de una muestra en dos fracciones: se hace pasar la muestra por el tamiz elegido, realizándose el tamizado cuantas veces sea posible hasta cerciorarnos de que se el material que quede es el que no corresponde a la luz de la malla. Se reúne todo el material que pasa por el tamiz empleado, obteniendo así dos fracciones, la retenida y la pasante.

Muestra precisa para los distintos ensayos: están reflejadas en la norma correspondiente de cada ensayo.

1.3.3.2.2. Determinación de la humedad (UNE-EN 12880:2015).

Esta norma es aplicable para la determinación de la materia seca y del contenido de humedad de lodos líquidos, pastosos y sólidos.

Las muestras del lodo son secadas hasta peso constante en una estufa a 105 ± 5 °C. La diferenciación entre los pesos respecto el antes y el después del proceso del secado es utilizada para calcular el contenido de materia seca y el contenido de humedad.

Durante el almacenamiento, las muestras del lodo pueden alteraciones que influirían en los resultados del análisis. También pueden ser alteradas químicamente durante el proceso de secado.

Aparatos:

- Estufa de secado.
- Desecador.
- Balanza analítica.
- Cápsula de evaporación o crisol.

Procedimiento:

Se pone una cápsula de evaporación o crisol vacío en la estufa de secado a 105 °C y se deja así hasta transcurridos 30 minutos. Tras ser enfriado en un desecador a temperatura ambiente, el recipiente es pesado con una precisión de 1 mg (m_a).

Si se va a utilizar el mismo crisol para la siguiente medida de la pérdida de peso por calcinación, tendrá que ser sometido a una calcinación a 550 °C por un tiempo mínimo de 30 minutos.

Dependiendo del nivel de humedad, se pesa en la cápsula de evaporación o en el crisol una cantidad recomendable de lodo (m_b) de tal manera que la materia pese al menos 0,5 g.

La cápsula de crisol o de evaporación que contiene la muestra en una estufa de secado es colocada y ajustada a 105 °C, de tal forma que la materia seca obtenga un peso de al menos 0,5 g.

Una vez fría gracias al desecador, el crisol o cápsula de evaporación es pesada por vez primera con el contenido (m_c).

El contenido de materia seca ($m_c - m_a$) debe ser considerada como constante si el peso que se obtiene tras una hora más de secado no difiere en más del 0,5% del valor previo o en 2 mg.

En el caso contrario se repite el secado hasta obtener peso constante.

Expresión de los resultados:

$$W_{dr} = \frac{(m_c - m_a)}{(m_b - m_a)} f$$

Ecuación 7. Fórmula para el cálculo del contenido de materia seca de la muestra

$$W_w = \frac{(m_b - m_c)}{(m_b - m_a)} f$$

Ecuación 8. Fórmula para el cálculo del contenido de materia húmeda de la muestra

Donde:

W_{dr} , corresponde al contenido de materia seca de la muestra y se expresa en tanto por ciento o gramos por kilogramos.

W_w , corresponde a la humedad de la muestra y se expresa en tanto por ciento o gramos por kilogramo.

m_a , corresponde al peso de la cápsula vacía o crisol y se expresa en gramos.

m_b , corresponde al peso de la cápsula o crisol que contiene la muestra de lodo y se expresa en gramos.

m_c , corresponde a peso de la cápsula o crisol que contiene la muestra seca del suelo y se expresa en gramo.

f , corresponde al factor de conversión el cual es igual a 100 para la expresión de los resultados en forma de tanto por ciento y $F= 1000$ para la expresión de los resultados en gramos por kilogramo.

Informe de ensayo:

El informe debe incluir:

- Referencia a esta norma.
- Toda la información que se requiera para la identificación de la muestra de lodo.
- Descripción del pretratamiento de la muestra.
- Resultados de la determinación realizada.

- Todo aquel detalle no especificado en esta norma europea y cualquier otra circunstancia que pudiera haber afectado a los resultados.

Tabla 2. Datos de precisión para el contenido de materia seca. Fuente: AENOR

Muestra	l	n	NAP %	$\bar{X}$ %	σ_R %	CV_R %	σ_r %	CV_r %
Lodo 1	4	15	0	28,2	2,329	8,26	1,939	6,88
Lodo 2	4	15	0	27,9	0,63	2,26	0,423	1,52
Lodo 3	8	23	25	8,29	1,256	15,15	0,334	4,03
Lodo 4	8	23	25	9,32	0,916	9,83	0,308	3,30
Lodo 5	3	13	0	4,11	0,1	2,43	0,041	1,00
Lodo 6	3	13	0	2,88	0,167	5,80	0,065	2,26
Lodo 7	7	—	0	4,21	0,277	6,58	0,109	2,59
Lodo 8	7	—	0	3,49	0,606	17,36	0,151	4,33
l es el número de laboratorios; n es el número de valores; NAP es el porcentaje de valores rechazados; $\bar{X}$ es la media global; σ_R es la desviación estándar de reproducibilidad; CV_R es el coeficiente de variación de reproducibilidad; σ_r es la desviación estándar de repetibilidad; CV_r es el coeficiente de variación de repetibilidad.								

1.3.3.2.3. Determinación de los límites de Atterberg (UNE-EN ISO 17892-12:2018).

Los dos límites de Atterberg de un suelo son: el límite líquido y el límite plástico. El límite líquido representa la humedad en la que el suelo pasa de ser líquido a plástico. En la norma, se explica cómo determinar el límite líquido en una muestra de suelo natural o en una muestra donde se haya eliminado material de más de 0,4 mm. Se describen dos métodos: el método del cono de caída y el método de Casagrande, que no deben confundirse con otro método según la Norma ISO 17892-6 (Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 6: Ensayo por caída de cono). Por otro lado, el límite plástico se refiere a la humedad en la que el suelo deja de ser plástico al secarse. Por lo general, la determinación del límite plástico se realiza junto con la del límite líquido. Se reconoce que los resultados de los ensayos pueden variar debido al criterio del operador.

Límite líquido:

Aparatos:

- Balanza.
- Porta muestras.
- Agua.
- Aparatos auxiliares.
- Espátulas.
- Botella con difusor.
- Placas de evaporación.
- Tamices que cumplan la Norma ISO 3310-1.
- Placa llana de amasado.
- Regla metálica de unos 100 mm de longitud.

Método del cono de caída:

El aparato debe permitir que el cono se mantenga sujeto firmemente y sea liberado instantáneamente para caer libremente en dirección vertical en la muestra del ensayo de suelo.

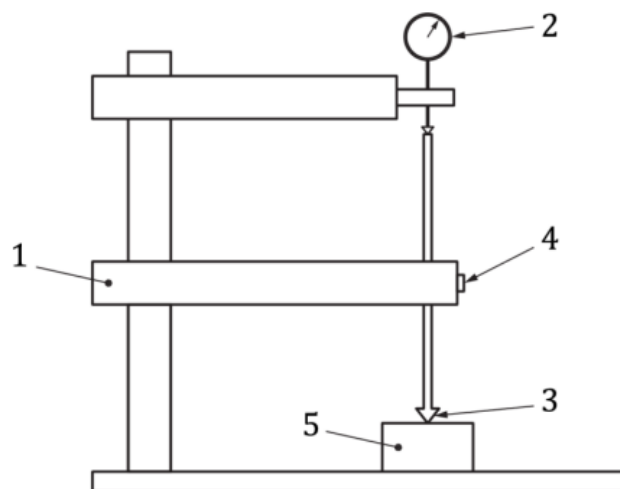


Figura 15. Equipo de medida para el ensayo mediante el procedimiento de caída de cono. Fuente: normativa AENOR

Donde:

- 1 mecanismo de ajuste vertical.
- 2 aparato de medición de la penetración.
- 3 cono de caída.
- 4 botón de sujeción/liberación.
- 5 recipiente para la muestra de ensayo.

El equipo del cono de caída necesita contar con un sistema de medición para registrar la penetración del cono en la muestra de ensayo después de ser liberado. Este sistema debe tener una precisión de 0,1 mm o superior, con un rango de medición de 5 mm a 20 mm para el cono de 60 g/60°, o de 10 mm a 30 mm para el cono de 80 g/30°.

Conos:

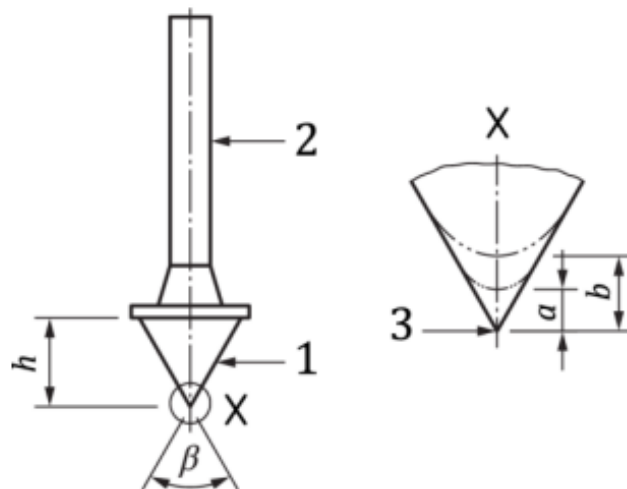


Figura 16. Detalle del cono de caída. Fuente: normativa AENOR

Donde:

- 1 cono.
- 2 fuste.
- 3 punta del cono.

“a” desviación respecto de la punta geométrica, al fabricarse.

“b” Máximo desgaste de la punta.

“h” Altura de la punta cónica.

“ β ” Angulo de la punta.

Tanto el cono de 60 g/60° como el cono de 80 g/30° son adecuados para su uso, siempre y cuando satisfagan los criterios establecidos en la tabla 3, ya que han demostrado ofrecer valores prácticamente idénticos del límite líquido. Se pueden emplear otros tipos de conos siempre que puedan demostrar resultados similares a los obtenidos con los ensayos detallados en este documento.

Tabla 3. Conjunto de conos de caída-especificaciones típicas de fabricación relativas a masa y dimensiones

Masa del cono y del fuste	g	60 ± 0,06	80 ± 0,08
Ángulo de la punta β	°	60 ± 0,2	30 ± 0,2
Altura de la punta del cono h	mm	≥ 20	≥ 30
Desviación a respecto de la punta geométrica, al fabricarse	mm	< 0,1	< 0,1

El cono de caída debe estar hecho de acero inoxidable o cromo, o recubierto con un material resistente a la corrosión. Debe tener superficies pulidas y lisas con una rugosidad media Ra menor a 0,8 μ m según la especificación de fabricación. Es importante que la superficie del cono se mantenga suave con el uso, y si se detectan daños significativos en esta superficie, se debe reemplazar por uno nuevo.

Método de la cuchara de Casagrande:

El equipo está compuesto por una especie de cuchara que se eleva mediante una leva y luego se deja caer desde una distancia determinada desde la base. Puede operar manualmente con una manivela o con un motor eléctrico. Se pueden utilizar una cuchara de Casagrande y un acanalador que cumplan con otras especificaciones, siempre y cuando se pueda demostrar que ofrecen resultados similares.

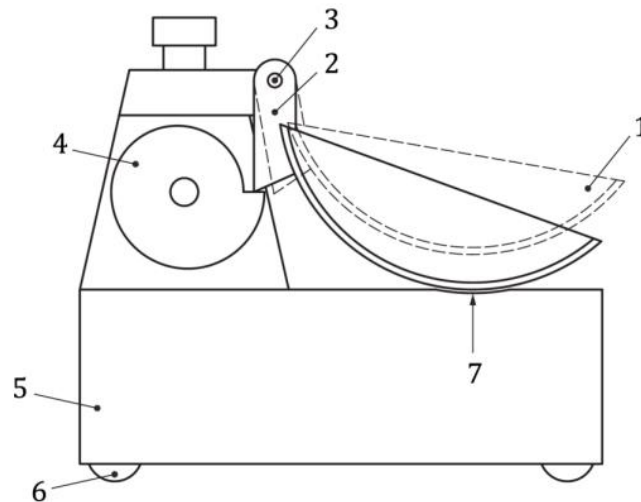


Figura 17. Esquema de la cuchara de Casagrande. Fuente: normativa AENOR

El aparato consta de:

- Base y patas de goma.
- Portamuestras.
- Leva.
- Carro.
- Motor (opcional).
- Acumulador.

Procedimiento de ensayo:

Elección del método de determinación del límite líquido:

Como se ha indicado anteriormente, podemos calcular el límite líquido mediante dos procedimientos distintos. Aunque el método del cono de caída es preferido por su mayor consistencia en los resultados, el método de Casagrande, con su extensa trayectoria, también es aceptado para su utilización.

Para ambas técnicas de determinación del límite líquido, se puede optar por realizar el ensayo de cuatro puntos o el de un punto. El procedimiento de cuatro puntos es el preferido. No obstante, el método de un punto puede ser adecuado en suelos con plasticidad bien conocida y en aquellos donde se han establecido correlaciones confiables.

Preparación de la muestra de ensayo:

Se establecen los procedimientos para realizar los ensayos de límite líquido en suelos en su estado natural, utilizando alrededor de 200 g de suelo con partículas menores a 0,4 mm. Se permite la eliminación de material grueso con tamices de 0,425 mm o 0,400 mm. Si es necesario secar los suelos antes del ensayo, se debe indicar en el informe. Para suelos susceptibles a la oxidación, se recomienda realizar los ensayos inmediatamente después de la extrusión o sellar las muestras hasta el momento del ensayo. Se detallan los pasos para el tratamiento de muestras con material grueso y la determinación de la humedad. Además, se describe el proceso de amasado de las muestras para ajustar la consistencia requerida en el ensayo. Se enfatiza la importancia de evitar la presencia de burbujas de aire durante el mezclado y se establecen los tiempos de equilibrio con agua según las necesidades del suelo. Se indica cómo proceder en caso de necesitar añadir o eliminar agua de la muestra y se recomienda determinar el límite líquido lo más pronto posible después del remoldeado.

Determinación del límite líquido con el método del cono de caída:

Se colocan porciones de la pasta remoldeada en un recipiente limpio y seco con una espátula, asegurándose de evitar la presencia de burbujas de aire. Se elimina el exceso de suelo para obtener una superficie lisa. Es importante tener en cuenta que el límite líquido puede ser afectado por la presencia de burbujas de aire durante el remoldeado o al colocar la pasta en el recipiente, así como por un remoldeado insuficiente. Luego, se procede a bloquear el cono de caída en su posición más elevada y ajustar la punta del cono para tocar la superficie del suelo. Se marca la superficie del suelo con un ligero movimiento y se registra la posición inicial del fuste del cono con precisión. Posteriormente, se libera el cono de penetración y se deja asentar por un corto periodo de tiempo. Se registra la profundidad de penetración con precisión y se calcula la diferencia entre la posición inicial y final del fuste del cono. Se verifica que la profundidad de penetración esté dentro del rango requerido para el tipo de cono utilizado. En caso contrario, se ajusta la consistencia de la pasta remoldeada añadiendo o eliminando agua. Este proceso se repite hasta que la diferencia entre dos lecturas sucesivas sea menor al valor indicado en la tabla de referencia (tabla 5). Finalmente, se limpia cuidadosamente el cono y se repite el procedimiento hasta cumplir con los requisitos establecidos en la tabla 4.

Tabla 4. Requisitos del cono de penetración

Tipo de cono	60 g/60°	80 g/30°
Rango de penetración del cono permitido	7 mm a 15 mm	15 mm a 25 mm
Límite líquido (w_L) determinado a una profundidad de penetración de	10 mm	20 mm
Diferencia máxima entre dos medidas sucesivas	0,4 mm	0,5 mm

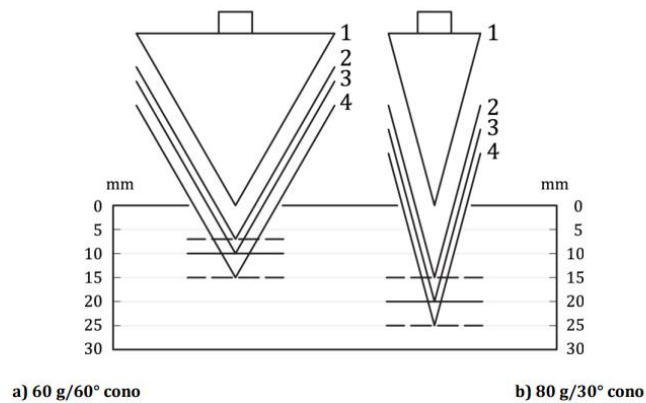


Figura 18. Requisitos del cono de penetración

Donde:

- 1 posición inicial antes de la caída.
- 2 penetración mínimo.
- 3 penetración correspondiente.
- 4 penetración máxima.

Se extrae una muestra de la pasta remoldeada con un mínimo de 15 g de la zona donde penetró el cono, y se calcula la humedad según la Norma ISO 17892-1. Luego, se retira el resto de la pasta del recipiente, se ajusta el contenido de agua y se mezcla nuevamente para asegurar una distribución homogénea. Se repiten los pasos anteriores para obtener al menos cuatro puntos de ensayo con diferentes niveles de humedad, distribuidos uniformemente a lo largo del rango de penetración establecido. Es esencial que al menos un punto esté por encima y otro por debajo de la profundidad de penetración correspondiente al límite líquido. La humedad de la muestra no debe variar de forma alternativa, sino aumentar o disminuir gradualmente. Se sugiere realizar el ensayo desde las condiciones más secas hacia las más húmedas, aunque también es aceptable hacerlo en sentido contrario. Durante el procedimiento, si es necesario dejar el suelo reposar, se

debe cubrir para evitar que se seque. En caso de utilizar el método de un punto, se debe repetir la penetración al menos una vez para verificar la coherencia de las medidas dentro del rango permitido. Las mediciones repetidas deben ser consistentes y concordar con la tabla de referencia. Cada penetración debe ir acompañada de su propia determinación de humedad. Si las mediciones de humedad difieren en más del 5% relativo, el ensayo debe repetirse para garantizar la precisión de los resultados.

Determinación de límite líquido por el método de la cuchara de Casagrande:

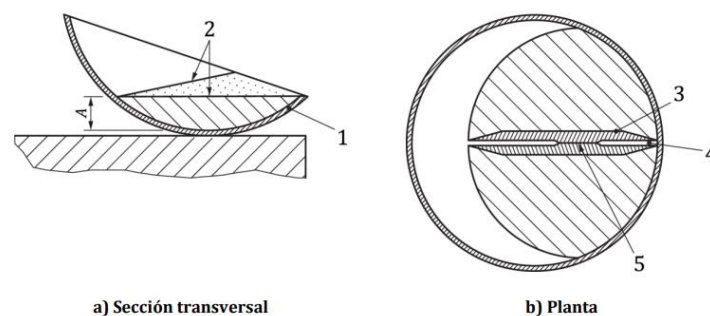


Figura 19. Detalle del procedimiento de la Cuchara de Casagrande

Donde:

1 cuchara.

2 nivel de la superficie de ensayo.

3 esquema de las paredes perfiladas por el surco al cortar.

4 base de la cuchara descubierta por el surco al cortar.

5 cierre de 10 mm del surco al final del ensayo.

El proceso consiste en usar un acanalador para hacer un surco en una muestra de suelo sobre la superficie de una cuchara. Para arcillas, se hace un surco en una sola pasada; para limos, pueden ser necesarias varias pasadas arrastrando un poco de muestra cada vez. Luego, se eleva y se deja caer la cuchara girando la manivela a cierta velocidad, contando los golpes mientras se observa cómo el surco se cierra por la fluencia del suelo. Se detiene el giro cuando el surco se cierra en 10 mm y se anota el número de golpes. Se verifica que este número esté dentro del rango requerido y, de ser necesario, se ajusta la consistencia de la muestra con agua antes de repetir el procedimiento.

Después de determinar la humedad de una muestra de suelo remoldeada, se ajusta el contenido de agua y se mezcla nuevamente. Se repiten los pasos para obtener al menos cuatro puntos de ensayo con diferentes humedades, asegurándose de limpiar y secar la cuchara entre cada uno. Estos puntos deben estar dentro de un rango específico y distribuidos uniformemente a lo largo del mismo. La humedad debe ajustarse gradualmente. Se recomienda cubrir el suelo si se deja reposar durante el procedimiento. Si se utiliza el método de un punto, se debe repetir el conteo de golpes al menos una vez y los resultados deben ser coherentes. Si hay una diferencia significativa en la humedad medida, el ensayo debe repetirse.

Tabla 5. Requisitos para el ensayo de la Cuchara de Casagrande

	Número de golpes
Rango del número de golpes	15 a 40
Número de golpes para determinar el límite líquido (w_L)	25
Máxima diferencia entre dos lecturas sucesivas para el ensayo de un punto	2

Límite plástico:

Para realizar el ensayo, es necesario contar con dos equipos: la placa de amasado y la varilla o cilindro hueco.

Se toma una muestra de suelo, se seca parcialmente y se moldea en forma de bola. Luego, se divide la bola en porciones y se moldean en cilindros de 6 mm de diámetro. Estos cilindros se ruedan en una placa hasta que alcancen un diámetro de 3 mm y comiencen a agrietarse. Se colocan los trozos de cilindro en un recipiente y se repite el proceso con otras porciones de la muestra. Se determina la humedad de los cilindros según la Norma ISO 17892-1. Si no se pueden formar cilindros de 3 mm de diámetro, la muestra se considera no plástica.

Resultados del ensayo:

Parte de la muestra con tamaño inferior a 0,4 mm

Después de se hayan eliminado partículas de la muestra de ensayo, es estimado el porcentaje de material con tamaño inferior a 0,4 mm(K) mediante la formula siguiente:

$$K = \frac{\left[\left(\frac{100 * m_1}{100 + w} \right) - m_r \right]}{\left(\frac{100 * m_1}{100 + w} \right)} * 100\%$$

Ecuación 9. Fórmula del cálculo del porcentaje de material inferior a 0,4 mm

Donde:

w equivale a la humedad de la muestra de ensayo separada y representada, se expresa en tanto por ciento.

M₁ equivale a la masa de suelo sin secar, se expresa en gramos.

M_r equivale a la masa seca de las partículas gruesas eliminadas con un tamaño superior a 0,4 mm (g).

- Determinación del límite líquido mediante el método del cono de caída:

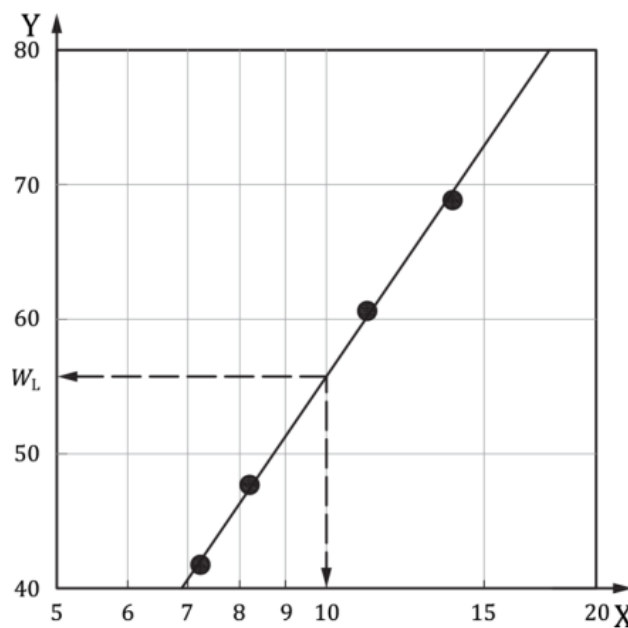


Figura 20. Ejemplo del resultado de un ensayo de límite líquido con el método del cono de caída con el cono de 60 g.
Fuente: AENOR

Donde:

X implica la penetración del cono (mm).

Y implica la humedad en (%).

En el gráfico se representan las humedades medidas en el eje vertical con una escala lineal, mientras que la penetración del cono se muestra en el eje horizontal con una escala logarítmica base 10 cuando se utiliza el cono de 60 g/60°. En caso de utilizar el cono de 80 g/30°, tanto la humedad como la penetración del cono se representan en escalas lineales. La Figura 6 ilustra un ejemplo para el cono de 60 g/60°.

Se traza una línea recta de mejor ajuste a los puntos representados en el gráfico. Si alguna de las humedades medidas difiere en más del 5% de esta línea, el punto puede ser excluido de la regresión. Si los otros tres puntos no se ajustan bien linealmente, se recomienda repetir el ensayo. La lectura del límite líquido (w_L) corresponde a la humedad para una penetración de 10 mm con el cono de 60 g/60° o de 20 mm con el cono de 80 g/30°. En caso de utilizar el método de un punto, se calcula la humedad y la penetración medias de varias determinaciones repetidas. El valor promedio de la humedad se ajusta utilizando factores de correlación preestablecidos para referirlo a la penetración estándar de 10 mm con el cono de 60 g/60° o 20 mm con el cono de 80 g/30°, con el fin de obtener el valor del límite líquido (w_L).

- Determinación del límite líquido por el método de Casagrande:

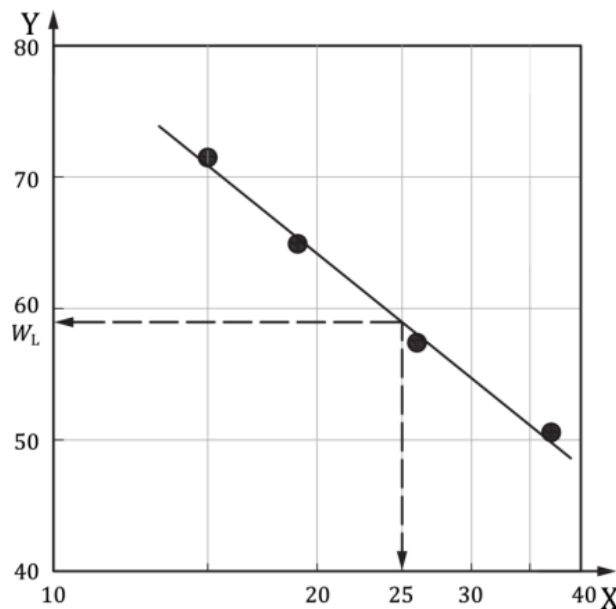


Figura 21. Ejemplo del resultado del ensayo de determinación. Fuente: AENOR

Donde:

X implica el número de golpes N.

Y implica la humedad expresada en (%).

En el gráfico se representan las humedades medidas en el eje vertical con una escala lineal, mientras que en el eje horizontal se muestra el número de golpes en una escala logarítmica base 10.

Se traza una línea recta que mejor se ajuste a los puntos del gráfico. Si alguna de las humedades medidas difiere en más del 5% de esta línea, se puede excluir ese punto de la regresión. Si los otros tres puntos no se ajustan bien linealmente, se recomienda repetir el ensayo. La lectura del límite líquido (w_l) corresponde a la humedad asociada con 25 golpes. En el caso de utilizar el método de un punto, se calcula el promedio de la humedad y el número de golpes de las determinaciones repetidas. El valor promedio de la humedad se ajusta utilizando factores de correlación predefinidos para referirlo a los 25 golpes estándar y así obtener el valor del límite líquido (w_l).

- Límite plástico:

Si la diferencia entre los resultados de humedad de los dos límites plásticos es superior al 2% absoluto para valores de w_p de 40% o menos, o mayor al 5% relativo para valores de w_p superiores al 40%, se recomienda repetir el ensayo del límite plástico. El límite plástico (w_p) se calcula como el promedio de las dos determinaciones de humedad del límite plástico.

Índice de plasticidad:

$$Ip = w_l - w_p$$

Ecuación 10. Fórmula de cálculo del Índice de Plasticidad (IP)

Donde:

w_l es el límite líquido.

w_p es el límite plástico.

Informe del ensayo:

El informe del ensayo debe incluir la siguiente información:

a) Detalles del método utilizado para obtener el límite líquido, como el método del cono de caída o el método de Casagrande, el ensayo de cuatro puntos o de un punto, y si se ajustó la humedad hacia arriba o hacia abajo.

b) Especificación del tipo de cono utilizado en caso de emplear el método del cono de caída.

c) En caso de utilizar el método de un punto de límite líquido, se deben registrar las lecturas de los ensayos y los factores de correlación utilizados.

d) Identificación de la muestra ensayada, incluyendo detalles como número de sondeo, número de muestra, número de ensayo, profundidad de la muestra, entre otros.

e) Descripción visual de la muestra ensayada y cualquier característica observada durante y después del ensayo, siguiendo los principios de la Norma ISO 14688-1.

f) Historia de la muestra, indicando si fue ensayada en su estado natural o después de un tamizado en húmedo u otro método de preparación.

g) Porcentaje de material que pasa a través del tamiz de 0,4 mm o el más cercano, especificando si se determinó por extracción manual o tamizado en húmedo.

h) Humedad de la muestra antes de la eliminación de partículas previa a la determinación del límite líquido o plástico, si fue medida.

i) Valor del límite líquido al punto porcentual más cercano.

j) Valor del límite plástico al punto porcentual más cercano, o indicar como "no plástico" si no se pudo determinar.

k) Valor del índice de plasticidad al punto porcentual más cercano, cuando sea determinado.

1.3.3.2.4. Análisis granulométrico (ISO “PARTE4” 17892-4:2016).

A continuación, se detalla un procedimiento para analizar la distribución de tamaños de partículas presentes en un suelo. La norma abarca la determinación, en un entorno de laboratorio, de la distribución de tamaños de partículas en una muestra de suelo mediante tamizado, sedimentación o una combinación de ambos, en el ámbito de las investigaciones geotécnicas. La distribución de tamaños de partículas es una característica física fundamental de un suelo, que influye en su clasificación y está relacionada con diversas propiedades geotécnicas e hidrogeológicas. Esta distribución proporciona información detallada sobre el suelo al dividir las partículas en clases según

su tamaño, determinado mediante tamizado y/o sedimentación. Mientras que los suelos gruesos se analizan principalmente por tamizado, los suelos finos o mixtos se suelen evaluar mediante una combinación de ambos métodos, dependiendo de la composición del suelo. El método de tamizado es válido para suelos sin cementar con partículas de tamaño inferior a 125 mm, y se describen dos métodos de sedimentación: el método del densímetro y el método de la pipeta.

Equipos:

- Balanzas.
- Estufa de secado.
- Dispositivos de medida del tiempo.
- Dispositivos de medida de la temperatura.
- Desecador.
- Recipientes para muestras de ensayo.
- Separación de la muestra después del tratamiento previo.

Método de tamizado:

- Tamices de ensayo:

Se acoplan a las normas ISO 3310-1 e ISO 3310-2.

Se recomiendan los tamices de 63 mm, 20 mm, 6,3 mm, 2,0 mm, 0,63 mm, 0,20 mm y 0,063 mm.

- Agitador de tamices (opcional):

Si es usado un agitador mecánico de tamices este debe encajar y mantener con suficiente seguridad los tamices con su tapa y fondo del tamiz.

- Equipos auxiliares:

Bandeja resistente a la corrosión.

Paleta.

Cubeta.

Cepillo de tamices.

Tubo de goma.

Cuarteador.

Vidrio de laboratorio.

Método del densímetro:

Densímetro: el densímetro utilizado debe ser de vidrio, con forma de torpedo, sin defectos visibles y preferiblemente fabricado conforme a una norma nacional. Tanto el tallo como el bulbo del densímetro deben tener una sección transversal circular y simétrica, sin cambios abruptos de sección. La escala y las inscripciones deben estar claramente marcadas y permanentes, sin irregularidades en el espaciado. El rango de lectura del densímetro debe comprender al menos desde 0,995 0 g/ml hasta 1,030 0 g/ml, con líneas de graduación cada 0,000 5 g/ml o menos. Las marcas pueden indicarse directamente en g/ml o como una diferencia desde 1,000 0 g/ml en mg/ml. Cada densímetro debe llevar un número único e indeleble para su identificación.

Algunos densímetros miden la densidad relativa de una solución (comparada con la del agua pura) en lugar de la densidad absoluta de la misma.

Probeta de sedimentación:

Las probetas de sedimentación deben tener una sección transversal constante a lo largo de toda su altura, ser transparentes para facilitar la lectura y estar marcadas a 1,000 ml. Su diámetro debe ser al menos el doble del bulbo del densímetro, y su longitud debe permitir que el densímetro flote libremente en 1,000 ml de agua pura. Se pueden emplear probetas cilíndricas más grandes con las mismas características, siempre y cuando se incremente proporcionalmente la cantidad de sustancias contenidas para mantener la concentración de la suspensión.

Baño termostático (opcional):

Durante el ensayo, es importante que la temperatura en las probetas no fluctúe más de 3 °C. Se recomienda emplear un baño termostático con control de temperatura, a menos que la temperatura ambiente en la sala sea estable. En caso de usar un baño termostático, el nivel del agua en él debe mantenerse constante, al menos a la altura de la suspensión en la probeta de sedimentación, a lo largo de todo el procedimiento. Este

control de temperatura ayuda a prevenir la formación de corrientes de convección en la suspensión, las cuales podrían afectar los resultados del ensayo.

Agitador mecánico o mezclador:

El agitador mecánico o mezclador debe tener la capacidad de mantener una suspensión estable con la cantidad correcta de suelo y agua, evitando ser demasiado vigoroso para evitar la fractura o rotura de las partículas de suelo.

Método de la pipeta:

Pipeta:

La pipeta debe tener un volumen equivalente al 2% del volumen de la suspensión de suelo y debe ser instalada en la configuración de pipeta.

Probeta de sedimentación:

Las probetas de sedimentación, con un volumen específico marcado, deben tener una sección transversal constante en toda su altura y ser transparentes para facilitar la lectura. Se aconseja que estas probetas tengan un volumen mínimo de 500 ml.

Recipientes para extraer una muestra de la pipeta:

Los recipientes utilizados para secar las partes de la suspensión extraídas con la pipeta deben ser apropiados, como pesa sustancias de vidrio con tapones de vidrio esmerilado o platillos evaporadores. Para una pipeta de muestreo de 10 ml, se recomiendan pesa sustancias de vidrio de unos 25 mm de diámetro y aproximadamente 50 mm de altura.

Baño termostático (opcional):

Durante el ensayo, es crucial mantener la temperatura en las probetas dentro de un rango de variación de 3 °C. Se recomienda el uso de un baño termostático con control de temperatura, a menos que la sala esté climatizada de manera adecuada. En caso de emplear un baño termostático, es fundamental mantener el nivel del agua al menos a la altura de la suspensión en la probeta de sedimentación durante todo el proceso. Controlar la temperatura ayuda a prevenir la formación de corrientes de convección en la suspensión, las cuales podrían influir en los resultados obtenidos.

Agitador mecánico o mezclador:

El agitador mecánico o mezclador debe ser capaz de mantener una suspensión estable con la cantidad correcta de suelo y agua, evitando ser demasiado energético para evitar la fractura o rotura de las partículas de suelo.

Centrifugadora (opcional):

La centrifugadora, el filtro de vacío u otros equipos similares, junto con sus accesorios, deben ser apropiados para filtrar partículas en un proceso inicial para eliminar sales, materia orgánica y/o calcárea.

Reactivos:

Además del agua los siguientes reactivos deben ser identificados como de calidad analítica reconocida:

- Agua.
- Agente dispersante.
- Peróxido de hidrógeno (opcional).
- Ácido clorhídrico (opcional).

Procedimiento de ensayo:

Selección del método de ensayo:

Antes de llevar a cabo un ensayo, es importante especificar el método a utilizar o la combinación de métodos a emplear. En general, no es necesario realizar un ensayo de sedimentación si una muestra tiene menos del 10% de partículas menores de 0,063 mm. Del mismo modo, no suele ser necesario realizar un ensayo completo de tamizado si todas las partículas de la muestra son menores a 2 mm y contienen menos del 10% de partículas mayores de 0,063 mm. Para el resto de las muestras, se recomienda realizar un ensayo combinado de tamizado y sedimentación para determinar la distribución completa del tamaño de las partículas.

Método de tamizado:

Es más recomendable la preparación húmeda de los suelos con partículas inferiores a 0,063 mm ya que si la muestra fuese seca incurriría en errores significativos, para obtener una muestra representativa para el ensayo, se divide o se cuartea la muestra original. La cantidad inicial de la muestra húmeda necesaria depende del tamaño máximo

de las partículas presentes y del contenido de humedad del suelo. Se aconseja que la masa de la muestra seca para el ensayo sea la especificada en la tabla 6.

Tabla 6. Masas mínimas recomendadas para el tamizado. Fuente: AENOR

Diámetro de las partículas D_{max}^a mm	Masas mínimas recomendadas^b g
< 2,0	100
2,0	100
6,3	300
10	500
20	2 000
37,5	14 000
63	40 000
a Diámetro máximo de las partículas del suelo, excluyendo la presencia de alguna partícula gruesa discontinua b La utilización de una muestra de masa inferior que el valor mínimo recomendado indicado, necesita reflexión, aunque pueda ser suficiente para la realización del ensayo.	

Para diámetros máximos ($D_{m\acute{a}x.}$) menores a 20 mm, se debe estimar la masa mínima mediante interpolación de los valores de la tabla 6. En cambio, para diámetros máximos superiores a 20 mm, la masa mínima recomendada debe calcularse utilizando la fórmula siguiente.

$$M_{mín} = \left[\frac{D_{m\acute{a}x}}{10} \right]^2$$

Ecuación 11. Fórmula para el cálculo del diámetro mínimo

Antes de tamizar, los suelos pueden ser tratados para eliminar sales disueltas, materia orgánica y/o calcárea, con el método y cantidad de material eliminado declarados en el informe. Para muestras secas, se determina la masa con una precisión de 0,1 g o 0,1% de la masa, eligiendo el mayor valor. En caso de muestras húmedas, se determina la masa húmeda y el contenido de humedad según la Norma ISO 17892-1. Para probetas con grava gruesa, se puede necesitar una separación inicial con un tamiz de 20 mm. Posteriormente, se limpia el material retenido en el tamiz de separación, se seca y se pesa

con precisión. Se mezcla el material retirado con el original antes de determinar la masa resultante. La muestra puede reducirse por cuarteo siempre que cumpla con las masas mínimas indicadas. El material más fino se coloca en agua, se agita y se lava a través de tamices específicos. Finalmente, se combina el material retenido en los tamices, se seca y se pesa con precisión.

Realización del ensayo:

Durante el ensayo de tamizado, en caso de sobrecarga en los tamices más pequeños, se puede reducir la cantidad de muestra por cuarteo u otro método similar. Si se ha utilizado un tamiz de separación, el material seco obtenido se tamiza a través de una serie de tamices con tamaños de malla decrecientes hasta llegar al tamaño del tamiz de separación. Se pesa el suelo retenido en cada tamiz y las masas no deben exceder los valores indicados en la tabla 6. Posteriormente, el material seco se tamiza a través de una serie de tamices con tamaños de malla decrecientes hasta 0,063 mm. Se pesa el suelo retenido en cada tamiz y todo el material que pase a través del tamiz de 0,063 mm. Las masas retenidas en cada tamiz no deben exceder los valores especificados en la tabla 7.

Tabla 7. Masas máximas de suelo retenidas en cada tamiz. Fuente: AENOR

Tamaño nominal de apertura de tamiz	Masa máxima de suelo sobre el tamiz de diámetro		
	450 mm	300 mm	200 mm
mm	kg	kg	g
0,063			40
0,20			70
0,63			125
2,0			220
6,3	2,0	0,8	
10,0	2,5	1,1	
20,0	3,5	1,5	
37,5	4,8	2,1	
63,0	6,3	2,8	

La masa máxima sobre tamaños de tamices no incluidos anteriormente se debe calcular según la formula siguiente:

$$M = \frac{A * \sqrt{d}}{200}$$

Ecuación 12. Fórmula de la masa máxima del suelo retenido

Donde:

“M” equivale a la masa máxima de suelo retenido en un tamiz(g).

“A” equivale al área de la sección transversal del tamiz (mm²).

“d” equivale al tamaño de apertura del tamiz (mm).

La eficacia del tamizado mecánico está influenciada por el tipo de suelo, el tiempo de tamizado, la carga en el tamiz y los parámetros de agitación como la amplitud y frecuencia. En suelos donde se emplea un agitador mecánico, se recomienda agitar la muestra al menos durante 10 minutos; mientras que, en un tamizado manual, cada tamiz debe agitarse al menos 2 minutos. El tamizado se considera completo cuando una agitación adicional de 1 minuto no produce un cambio de masa en el material retenido superior al 1% en cualquier tamiz. Si se supera la masa máxima permitida en algún tamiz, el suelo sobre ese tamiz se divide en porciones más pequeñas para ser tamizadas por separado, calculando la masa total sobre cada tamiz como la suma de las masas retenidas en cada porción. Al finalizar el ensayo, se debe sumar la masa retenida en todos los tamices y la fracción que pasa a través del tamiz de 0,063 mm. En caso de reducción de muestra por cuarteado, las masas después de la división deben ajustarse multiplicándolas por la relación de masa antes y después de la división.

Si el total obtenido difiere del 1% de la masa antes del tamizado, se debe repetir.

Método de densímetro:

En el ensayo, es necesario analizar la fracción de cada muestra que pase a través del tamiz de 0,063 mm, excluyendo el material mayor a 2 mm en la probeta de sedimentación. Es importante destacar que las partículas de arena se asientan rápidamente durante la sedimentación inicial, y la presencia de pequeñas cantidades de arena no afecta negativamente el proceso. En entornos con control climático, se debe mantener un dispositivo calibrado para medir y registrar las temperaturas máxima y mínima cerca del área de ensayo. Cuando se utiliza un baño termostático, se debe tener cuidado de que su sistema de circulación no genere vibraciones en la muestra en suspensión. Todas las lecturas del densímetro deben registrarse multiplicando la parte decimal por 1,000; por

ejemplo, 1,030 0 se registra como 30,0. Esta convención debe aplicarse a todas las lecturas, cálculos y calibraciones.

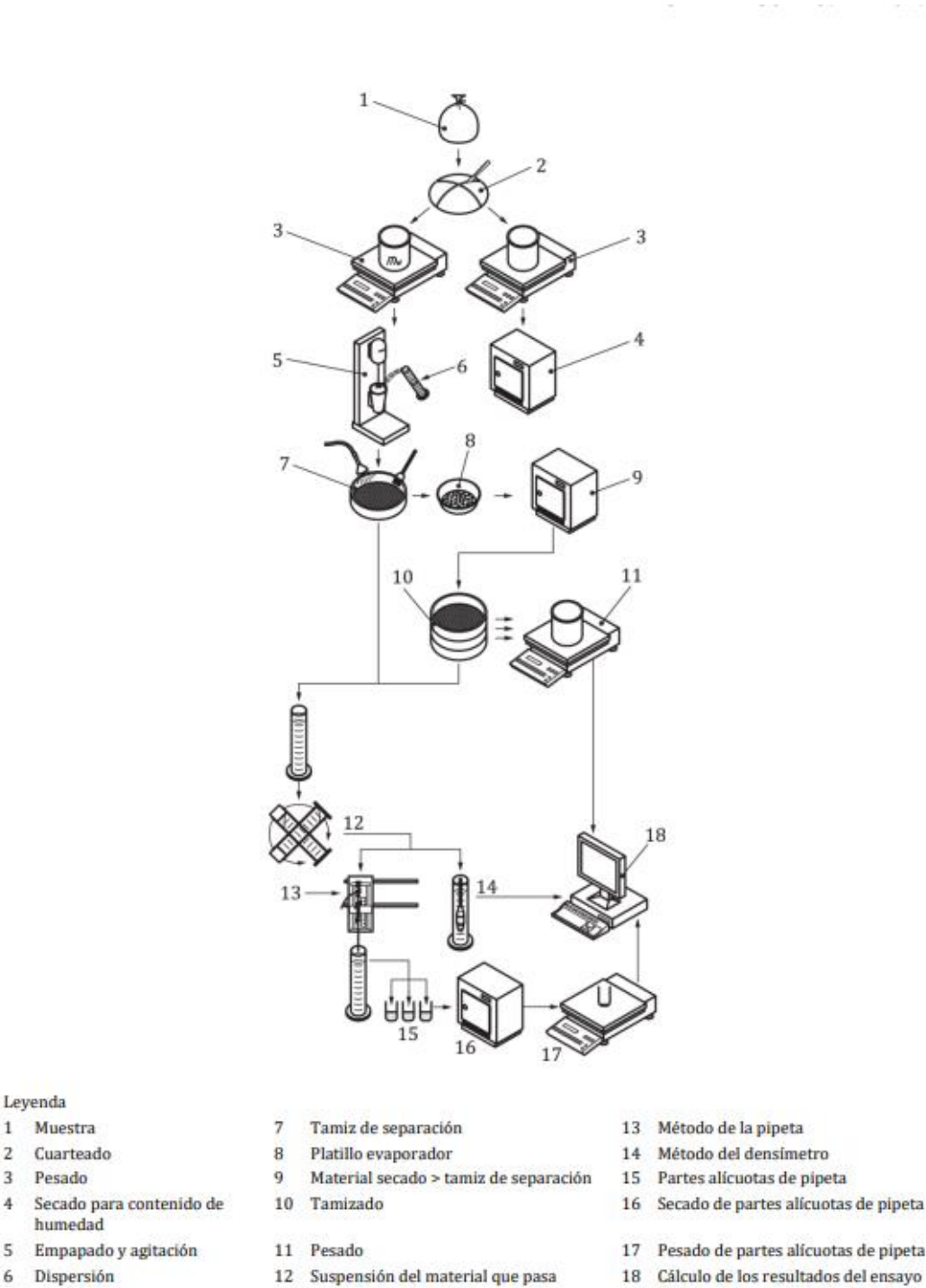


Figura 22. Procedimiento general de sedimentación. Fuente: AENOR

Preparación de la muestra:

Para realizar el ensayo adecuadamente, se debe considerar la masa húmeda inicial de la muestra de suelo, la cual varía según la distribución granulométrica y el contenido de humedad. Se recomienda tener entre 20 g y 30 g de material inferior a 0,063 mm. Es crucial mantener una concentración de suspensión alrededor de 25 g de sedimento por litro de solución para evitar perturbaciones en el proceso de sedimentación. Se debe determinar el contenido de humedad y, si es necesario, la densidad de las partículas en muestras separadas según las normas correspondientes. En presencia significativa de materia orgánica o componentes carbonatados, se aconseja realizar un tratamiento previo. La muestra de suelo se pesa con precisión y se coloca en un recipiente adecuado con un agente dispersante si es necesario. Tras agitar la suspensión, se procede al tamizado de la fracción fina y se transfiere a la probeta de sedimentación. El material retenido en el tamiz se seca, se enfría y se pesa con precisión. Si se ha realizado un tamizado de separación, se descarta el material indicado anteriormente. En caso contrario, se tamiza el material retenido según lo descrito previamente. Se debe esperar a que la temperatura de la probeta de sedimentación se iguale con la del ensayo si son diferentes. Se prepara una probeta de sedimentación con una solución de referencia para comparación. Esta solución puede ensayarse junto con las muestras o antes, aplicando un factor de corrección de temperatura en este último caso.

Ejecución del ensayo:

En el procedimiento, se coloca el densímetro en la solución de referencia asegurando que flote libremente y se registra la lectura con precisión. Luego, se agita la suspensión vigorosamente para lograr una mezcla completa, seguido de la colocación del densímetro sin agitar la suspensión. Se toman varias lecturas del densímetro durante los primeros 5 minutos, con intervalos específicos. Después de estas lecturas iniciales, se continúa tomando lecturas adicionales a intervalos de tiempo determinados. El ensayo puede finalizarse cuando se ha determinado la proporción más fina de 0,002 mm. Se registra la temperatura de la suspensión en momentos específicos con precisión.

Método de la pipeta:

La muestra debería ser preparada como en el método del densímetro.

Ejecución del ensayo:

Se preparan recipientes secos siguiendo las indicaciones de temperatura y se registra la masa de cada uno con precisión. Luego, se agita enérgicamente la suspensión de suelo para lograr una mezcla completa y se coloca la probeta en posición sin agitar la suspensión. Se determinan los tiempos de muestreo utilizando parámetros conocidos y se toman al menos tres lecturas para diferentes tamaños de partículas, incluyendo las fracciones de limo y arcilla. Se elige una profundidad de inserción para la pipeta y se sigue un procedimiento específico para cada tiempo de muestreo, evitando agitar la suspensión. Posteriormente, se vacía la pipeta en un recipiente, se enjuaga y se registra la temperatura antes de secar el contenido en una estufa para obtener una masa constante. Se repite este proceso con una muestra de referencia preparada una vez por lote de dispersante.

Ensayos combinados:

Es necesario realizar un ensayo de tamizado y un ensayo de sedimentación en probetas diferentes de una misma muestra. Cada ensayo debe llevarse a cabo por separado, siguiendo el procedimiento correspondiente, con la excepción de no duplicar el análisis de tamizado en la probeta de sedimentación.

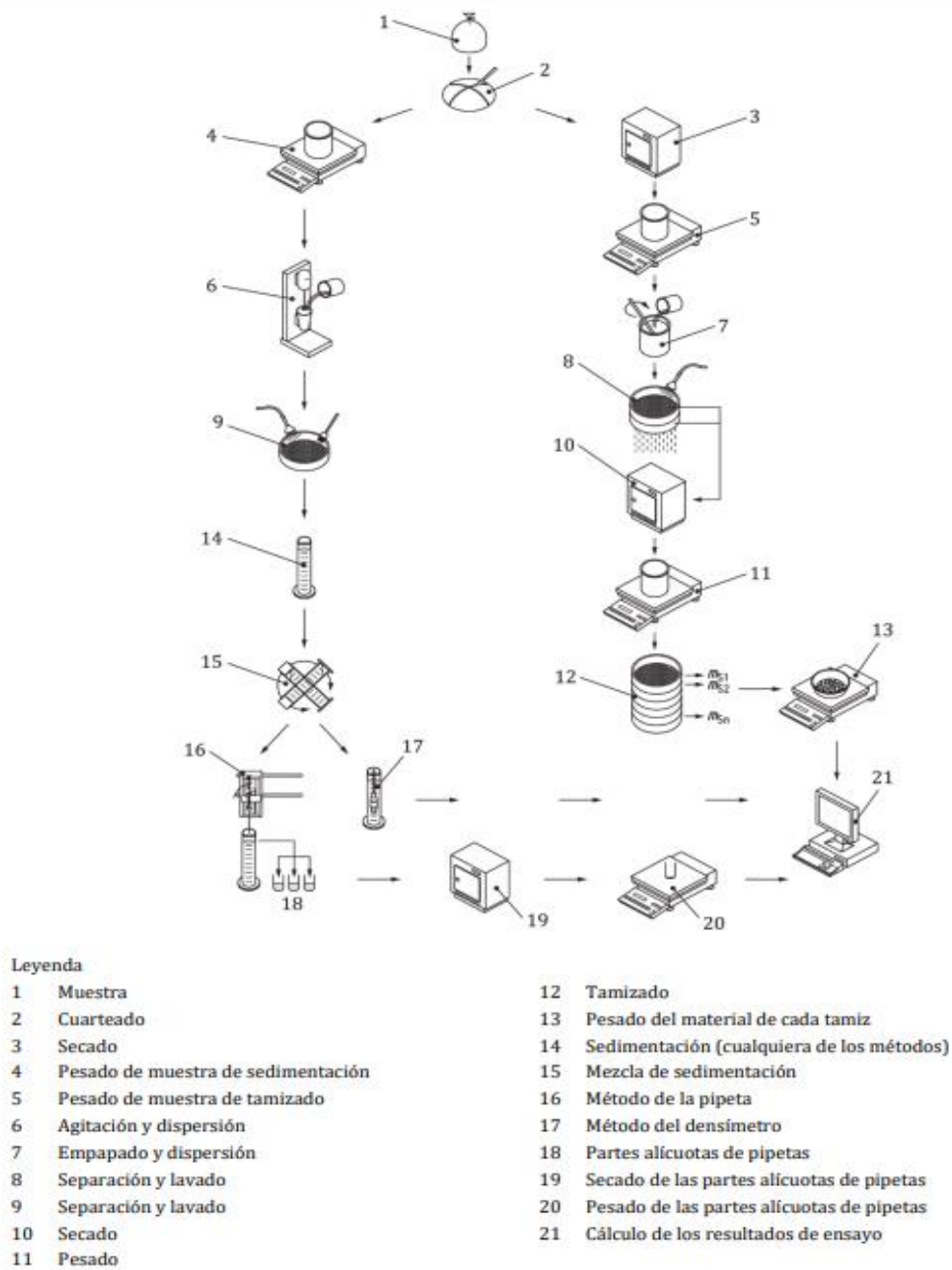


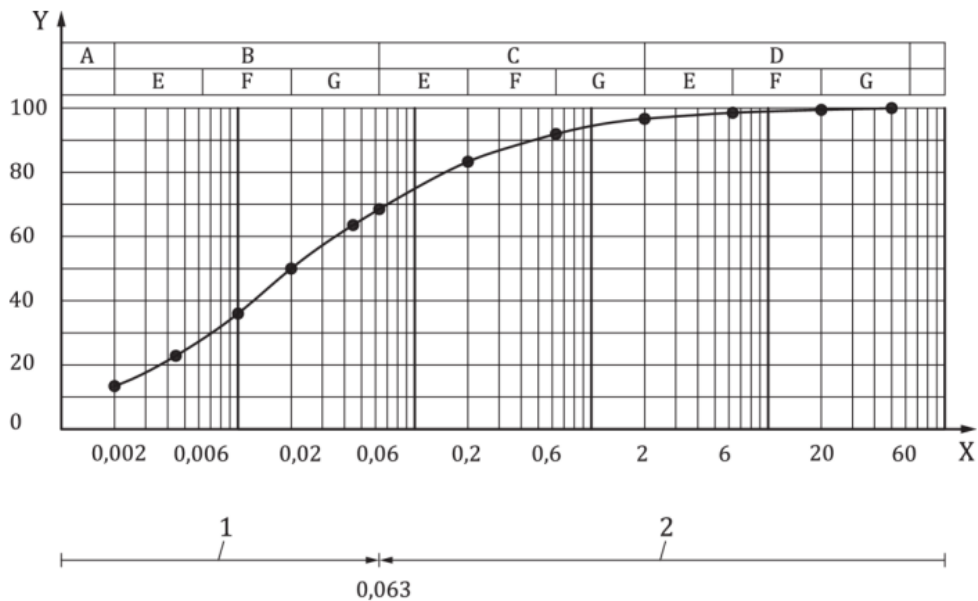
Figura 23. Procedimiento combinado general. Fuente: normativa AENOR

Los resultados del ensayo se observan en la norma.

Informe final:

El informe del ensayo se debe indicar que se ha realizado conforme a la Norma ISO 17892 e incluir la siguiente información: los métodos de ensayo utilizados, una descripción visual de la muestra con sus características observadas, la identificación de la muestra ensayada, los resultados presentados en un gráfico semilogarítmico

combinando los resultados de tamizado y sedimentación, la densidad de las partículas sólidas utilizada en los cálculos, el método de tratamiento previo aplicado, cualquier desviación del procedimiento especificado y detalles relevantes para interpretar los resultados, la cantidad insuficiente de suelo si aplica, la forma en que se expresan las fracciones y la naturaleza y cantidad de las fracciones excluidas.



- Leyenda
- 1 Sedimentación
 - 2 Tamizado
 - A Arcilla
 - B Limo
 - C Arena
 - D Grava
 - E Fino
 - F Medio
 - G Grueso
 - X Granulometría
 - Y Porcentaje que pasa (%)

Figura 24. Ejemplo de resultado de distribución de tamaño de partículas. Fuente: normativa AENOR

1.3.3.2.5. Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe (UNE 103600:1999).

El objetivo del método es poder identificar rápidamente los suelos que puedan generar problemas de expansividad a consecuencia de cambios en su contenido de humedad. Los suelos se clasificarían en:

- No críticos.

- Marginal.
- Crítico.
- Muy crítico.

Aparatos y material necesario:

- Aparato Lambe.
- Marco metálico y base.
- Célula.
- Anillo dinamométrico.
- Materiales auxiliares: brochas, maza de compactación etc.

Preparación de la muestra:

Se seca al aire libre, en estufa o con secadores de aire frío o caliente, pero siempre a menos de 60 °C hasta que esta se pueda deshacer por medio del mazo de goma.

Una vez esté seca la muestra, se debe cuartear para obtener dos porciones de 1kg; una de las porciones se tamiza por el tamiz de 2,00 mm, el ensayo es realizado con la muestra que pasa por dicho tamiz.

El correspondiente al límite plástico. A este estado se le denomina así.

Al resultante de mantener durante 48h en un ambiente con una humedad relativa del 100% se le denomina húmedo.

El resultante de mantener una fracción durante 48h en un ambiente de humedad relativa 50% se le denomina seco.

Procedimiento operatorio:

Compactación del suelo. Obtención de la probeta:

Tabla 8. Procedimiento operatorio para compactación de suelos. Fuente: AENOR

Humedad	Nº de capas	Nº de golpes por capa
Límite plástico	1	5
Húmedo (100% H. relativa)	3	4
Seco (50% H. relativa)	3	7

Si se realiza con respecto al límite plástico, se coloca el suelo dentro de los anillos y se presiona con la maza uniformemente por toda su superficie, hasta dejarla plana a unos 3 mm por debajo de la cara superior del anillo guía seguidamente se dan los cinco golpes repartidos por dicha superficie.

Si es preparado con las condiciones denominadas húmedo y seco, se vierte en el interior del conjunto la cantidad de suelo que se considere necesaria para una vez finalizada la compactación, la altura de la capa sea ligeramente superior a $1/3$ de la altura del anillo, seguidamente se presiona con la maza de forma que el suelo quede bien distribuido. A continuación, se aplican los golpes que correspondan según el caso, repartiéndolos por toda la superficie. Antes de colocar la siguiente capa es necesario verificar esta con un objeto punzante en una profundidad comprendida entre 1 mm y 2 mm, para así facilitar la unión entre ellas. Aquí está un resumen de los pasos clave:

Después de la compactación, la superficie de la probeta debe quedar entre 3 y 6 mm por encima del plano de separación de los dos anillos. Si no se logra a la primera, se debe repetir el proceso ajustando la cantidad de suelo en cada capa. Una vez finalizada la compactación, se sueltan los elementos de fijación y se gira ligeramente el anillo guía para facilitar su separación y retiro. Se enrasa el suelo al nivel de la cara superior del anillo porta probeta, comenzando por los bordes y avanzando hacia el centro, hasta conseguir una superficie plana. Si queda alguna cavidad pequeña, se rellena con suelo del enrasado, teniendo cuidado de no alterar el resto de la probeta. Finalmente, se gira con suavidad el anillo porta probeta para despegarlo de la base y retirarlo. Si la compactación se hizo directamente sobre la base, se eliminan los restos de suelo que hayan podido quedar.

Montaje del equipo:

Se coloca la placa porosa inferior sobre la base del equipo y sobre ésta el anillo porta probeta, asegurando un buen contacto entre ambos elementos. Se sitúa el anillo guía encima del anillo porta probeta, quedando asegurado el ajuste por medio del encaje que ambos disponen.

Se fija el conjunto mediante los tornillos correspondientes y se colocan sobre la probeta la placa porosa y el pistón de carga. Se coloca en su posición el puente superior del marco metálico con el anillo dinamométrico, y se fija a las columnas por medio de las tuercas correspondientes. Se ajusta el vástago del anillo sobre la superficie del pistón de

carga hasta que se consiga una lectura del medidor de deformaciones equivalente a 40 Se fija la contratuerca del vástago, de manera que quede sin juego. Se comprueba que la lectura del medidor de deformaciones sigue siendo la correspondiente a 40 N.

Se anota el tiempo y se añade agua, se van tomando las lecturas a medida que el suelo se vaya hinchando, tras 2h se toma el valor de la del anillo dinamométrico y se calcula el valor de la fuerza correspondiente en N.

Obtención y expresión de los resultados:

El índice de hinchamiento es el cociente entre el valor de la fuerza calculada expresada en N y la sección de la probeta, expresada en mm^2 , el índice de hinchamiento se expresa en MPa^3 .

Una vez obtenido el índice de hinchamiento, se usa la gráfica y su curva correspondiente para halla el cambio de volumen potencial.

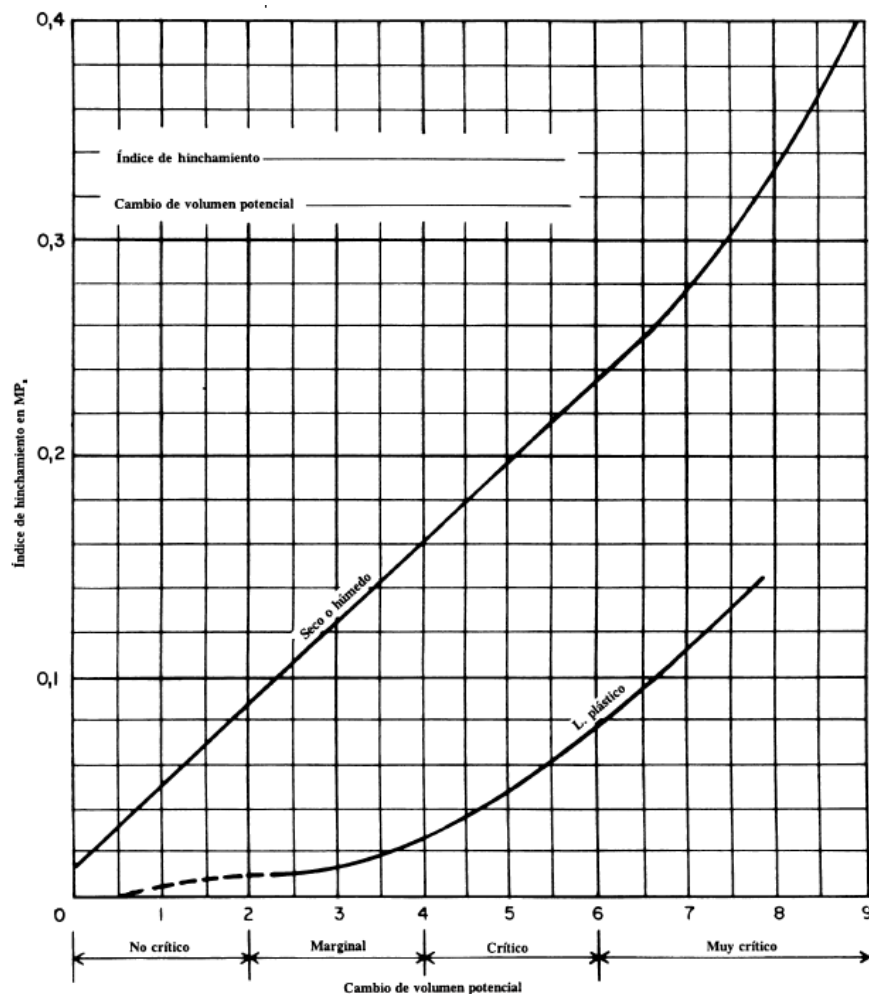


Figura 25. Gráfica para el cálculo del cambio de volumen potencial

BLOQUE II. REGIÓN DE ESTUDIO

2.1. Localización geográfica de la zona de trabajo.

La parcela donde se desarrollan los trabajos está ubicada en la urbanización “Los Almendros”. Dicha urbanización se localiza al inicio de la vía verde que se encuentra a continuación de la calle Úbeda de la ciudad de Linares (Jaén).

Para llegar al lugar, se coge la autovía A-32, tomando la salida hacia la carretera N-322 con dirección Linares. Al llegar a la ciudad de Linares, hay que alcanzar la calle Úbeda, continuar hasta el final de la calle hasta observar un carril sin asfaltar y a la izquierda se visualizará el letrero con el nombre de la urbanización. A continuación, se accede por la segunda puerta de la urbanización y la segunda parcela del lado derecho sería la que nos ocupa este trabajo (fig.26).



Figura 26. situación, área y perímetro. Fuente: sede catastro España

DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE	
Referencia catastral	
6270101VH4167S0001XF	
Localización	
DS DISEMINADO Es:1 Pl:00 Pt:11	
23700 LINARES (JAÉN)	
Clase	
Urbano	
Uso principal	
Residencial	
Superficie construida	
4.539 m²	
Año construcción	
2019	

Figura 27. Datos descriptivos. Fuente: Catastro electrónico de España

2.2. Marco geológico en la zona de trabajo.

En cuanto al marco geológico regional, la zona de Linares queda entre dos grandes unidades geomorfológicas: la meseta Ibérica y la depresión del Guadalquivir (fig.28).

La primera forma una penillanura donde se levantaron y erosionaron los materiales que constituyen el Zócalo Paleozoico. Los materiales originales carboníferos, con predominancia de los materiales arcilloso y en menor cantidad arenosos fueron plegados y metamortizados en la orogenia hercínica, transformándose mediante metamorfismo en pizarras, metareniscas y metagrauwacas.

La segunda unidad geomorfológica de las señaladas, la que se relaciona con el relleno neógeno de la depresión del Guadalquivir, está formada por depósitos marinos miocenos y en menor medida pliocenos. En estos depósitos los materiales que forman esta unidad, que sería la tercera de las series estratigráficas importantes de la zona, son de base a techo, brechas y conglomerados calizo-arenosos que pasan a arenas y areniscas (Tortonense), margas y margoarcillas.

En general los materiales que constituyen la cobertura poshercínica se disponen de formas subhorizontales, los fenómenos de basculamiento relativos a los bloques del zócalo han afectado también al recubrimiento postpaleozoico suprayacente, desde la época del Triásico. La existencia y actividad de este sistema de fallas de dirección aproximadamente NE-SO, además de definir la aparición local, en superficie, de una u otra de las diferentes unidades estratigráficas, y es responsable estructuralmente de la formación de los yacimientos filonianos de Linares (fig.29).

Atendiendo al marco geológico local, la zona se encuentra cerca de la falla de Linares.

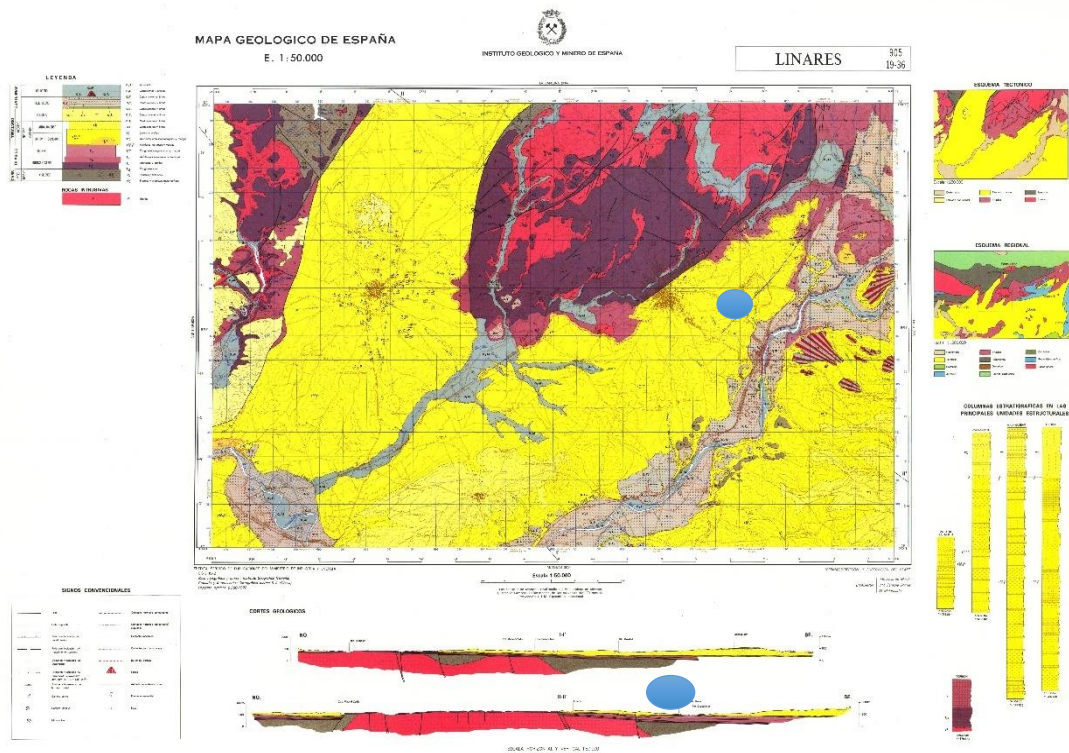


Figura 28. Mapa geológico de España. Hoja 905 "Linares" a 1:50.000 con señalización de la zona de estudio (Punto azul). Fuente: IGME

Específicamente, la zona de estudio está constituida litológicamente por: conglomerados, arenas, limos amarillos, yesos y sales haloideas, margas y areniscas; pertenecientes al Tortoniense superior.

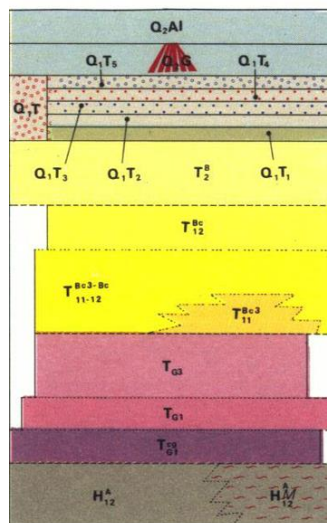


Figura 29. Leyenda (tramo T_{8c3}-B_{c11-12}). Fuente: IGME, Hoja 905 "Linares"

2.3. Sismicidad.

La sismicidad hace referencia a los movimientos telúricos que suceden en esta región. La normativa y criterio técnico españolas que la rigen son el código técnico de edificación (CTE) y la Norma sismorresistente NCSE 02, las cuales establecen los criterios técnicos y las medidas de prevención necesarias para garantizar la durabilidad de los edificios hechos en Linares.

Según la antigua norma sismorresistente P.D.S.-1 de 1974 Linares se sitúa en el área de intensidad sísmica de Grado VI < G < VIII, según la escala internacional Macro sísmica (MKS).

Según la actual norma de construcción sismorresistente NCS-94, a esta información puede añadirse que dicha área tiene asignado un valor de aceleración sísmica básica de 0,05 veces la aceleración de la gravedad ($a_b = 0,05 \text{ g}$), índice que representa un valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno, correspondiente a un periodo de retorno de 500 años.

La aceleración sísmica de cálculo dependerá del periodo de vida para el que se proyecte la construcción. Para un periodo de 50 años (construcción de normal importancia), la aceleración a_c , coincidirá con la aceleración sísmica básica ($a_c = 0,05 \text{ g}$), mientras que si se adopta un periodo de 100 años habrá que aplicar a aquella un coeficiente adimensional de riesgo (p) de valor 1,30 ($a_c = 0,065 \text{ g}$).

En la (fig.30) se observa la representación sísmica de la Linares y en la f(ig.31) como se interpretaría el sismo según el rango de intensidad.



Figura 30. Representación sismología anual en Linares. Fuente: Vulcano Discovery, Linares

Intensidad.	
Escala Macrosísmica Europea (EMS-98)	
Grado	
I. No sentido	No se siente, ni en las circunstancias más favorables.
II. Apenas sentido	La vibración se percibe solo por algunas personas (1%) especialmente personas en reposo en los pisos superiores de los edificios.
III. Débil	La vibración es débil y se percibe en interiores sólo por unas pocas personas. Las personas en reposo sienten un balanceo o ligero temblor.
IV. Ampliamente observado	El terremoto se percibe en interiores por muchas personas, pero al aire libre por muy pocas. Algunas personas se despiertan. El nivel de vibración no es alarmante. Traqueteo de ventanas, puertas y platos. Los objetos colgados se balancean.
V. Fuerte	El terremoto se percibe en interiores por la mayoría, al aire libre por unos pocos. Muchas personas que dormían se despiertan. Algunos escapan de los edificios, que tiemblan en su totalidad. Los objetos colgados se balancean considerablemente. Los objetos de porcelana y cristal entrecrocán. La vibración es fuerte. Los objetos altos se vuelcan. Puertas y ventanas se abren y cierran solas.
VI. Levemente dañino	Sentido por la mayoría en los interiores y por muchos en el exterior. En los edificios muchas personas se asustan y escapan. Los objetos pequeños caen. Daño ligero en los edificios corrientes, por ejemplo, aparecen grietas en el enlucido y caen trozos.
VII. Dañino	La mayoría de las personas se asustan y escapan al exterior. Los muebles se desplazan y los objetos caen de las estanterías en cantidad. Muchos edificios corrientes sufren daños moderados: pequeñas grietas en las paredes, derrumbe parcial de chimeneas.
VIII. Gravemente dañino	Pueden volcarse los muebles. Muchos edificios corrientes sufren daños: las chimeneas se derrumban; aparecen grandes grietas en las paredes y algunos edificios pueden derrumbarse parcialmente.
IX. Destructor	Monumentos y columnas caen o se tuercen. Muchos edificios corrientes se derrumban parcialmente, unos pocos se derrumban completamente.
X. Muy destructor	Muchos edificios corrientes se derrumban.
XI. Devastador	La mayoría de los edificios corrientes se derrumban.
XII. Completamente devastador	Prácticamente todas las estructuras por encima y por debajo del suelo quedan gravemente dañadas o destruidas.

Figura 31. Interpretación del rango de sismicidad MKS. Fuente: Vulcano Discovery

2.4. Climatología.

El clima y tiempo promedio en Linares se resume en:

Los veranos cortos muy cálidos, áridos y mayormente despejados mientras que los inviernos son fríos y parcialmente nublados. Las temperaturas están en el rango de 2 °C – 36 °C y muy rara vez desciende a -3 °C y superan los 40 °C.

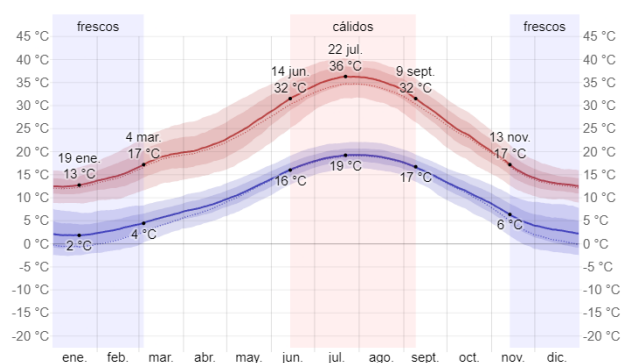


Figura 32. Gráfica de temperaturas promedio en Linares. Fuente: Vulcano Discovery, Linares

BLOQUE III. TRABAJO DE CAMPO

3.1. Introducción.

Las jornadas establecidas para realizar los ensayos de campo son los días 24 y 25 de abril, así como el 28 de mayo de 2024. El día 24 de abril se realiza el ensayo ERT y el día 25 de abril se realiza el primer ensayo de penetración dinamina tipo Borros, con una duración de ensayo de 15:24 h – 19:46 h. En el caso del día 28 de mayo, se realiza el segundo ensayo de penetración dinámica, con una duración de ensayo de 16:44 h – 20:19 h.

3.2. Campaña ERT.

La campaña de ERT se realizó el día 24 de abril de 2024, la cual comenzó a las 8:55 de la mañana y finalizó a las 12:09, con una temperatura de 12 °C (fig.33).



Figura 33. Temperatura. Fuente: Google tiempo Linares.

A la hora de realizar las medidas, se podrán observar dos particularidades en los resultados obtenidos por el equipo: la primera que hay una valla divisoria de metal, la cual incide en las mediciones, y la segunda, que una de las parcelas fue previamente rellenada con tierra para nivelarla transversalmente y para utilizarla en labores agrícolas.

El equipo de tomografía eléctrica fue trasladado desde las instalaciones de la EPSL hasta la parcela. Dicho equipo consta de: cableado de conexión entre electrodos y

el resistivímetro, los electrodos de corriente y potencial, el equipo de suministro de energía que se trata de una batería de 12V y el resistivímetro con el software para la visualización de los datos, material adicional como martillos para facilitar la inserción de los electrodos en el terreno, agua, la cual sería vertida encima de los electrodos para facilitar la transmisión de corriente al suelo y obtener mejores resultados y una cinta métrica para colocar la distancia entre cada electrodo.

Se lleva material suficiente para cubrir la totalidad del terreno, el cual consta de 78 m de perfil longitudinal. Para ello, se emplean 40 electrodos, los cuales fueron separados por una distancia de 2 metros entre ellos a la largo del perfil (fig.34).



Figura 34. Colocación de los electrodos. Fuente: propia

Después de haber realizado la colocación de los electrodos, se realiza la conexión entre los electrodos y el cableado que transmitirá la corriente (fig.35), para posteriormente pasar a conectar el cableado al resistivímetro y a la fuente de alimentación.



Figura 35. Conexión del cableado y los electrodos. Fuente: propia

En este momento, se configura el trabajo en el resistivímetro atendiendo a la configuración que se selecciona previamente en gabinete, en este caso se seleccionan las configuraciones Dipolo-Dipolo (fig.45) y Wenner-Schlumberger (fig.46), desarrolladas previamente en la sección de materiales y métodos.

Se definen el número de electrodos y la disposición de estos junto a la distancia que entre ellos guardan.

Se configuran los tiempos de inyección y corte de corriente de cada medida. Se trata de un ciclo de 300ms de inyección de corriente, dentro de este tiempo existe un retardo de 100ms para medir el potencial, siendo el tiempo de medida del potencial 200ms. Después existe un tiempo de 200ms sin inyección de corriente, y posteriormente se vuelve a repetir la medida cambiando el sentido de inyección de corriente entre los electrodos de corriente. Esta configuración de medidas es la misma para ambas configuraciones: Dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger.

Una vez configurado el software se inician las medidas, realizando un total de 332 medidas en la configuración Wenner-Schlumberger y 552 medidas en la configuración dipolo-dipolo.

3.3. Campaña de Ensayos de penetración dinámica.

Al observar las distintas condiciones y el uso dado a las dos parcelas de estudio, una de ellas con uso agrícola de regadío (huerta) y la otra en barbecho, las cuales tienen las mismas dimensiones y están separadas por una valla metálica de torsión simple y aproximadamente 2 metros de altura, se decide realizar un ensayo de penetración dinámica en cada una de ellas, observando la afección que pudiera tener cada uno de los usos. Así, la disposición de los ensayos de penetración dinámica (penetros 1 y 2) es visible en la fig.37 (las líneas verdes implican el perímetro de las dos parcelas, las amarillas la valla perimetral y la roja el “perfil ERT”) en (fig.45 y fig.46), en la que observamos en el radiograma la posición de los penetros.

La primera campaña de campo (penetro 1) comenzó a las 15:24 h del 25 de abril de 2024, con 19 °C de temperatura (fig.36), situando el equipo a 16,0 m en el eje longitudinal desde la puerta de acceso y en el tercio inferior del eje transversal de la parcela (fig.37). Hay que indicar que el ensayo de penetración dinámica fue detenido por falta de combustible del penetrómetro, si bien se había alcanzado una profundidad de golpeo de 16,00 metros y los valores estaban lejos de los necesarios para llegar a la zona de rechazo para el ensayo tipo borros (100 golpes en 20 cm), quedando solo disponibles 3 varillas extra y concluyendo que no se hubiera llegado al rechazo. Esto es fácilmente interpretable en la (fig. 48), ya que en esta zona las resistividades son muy bajas.



Figura 36. Temperatura para la primera campaña de campo de penetración dinámica. Fuente: Google tiempo Linares



Figura 37. Croquis de la disposición de los penetros y perfil ERT en la zona de estudio. Fuente: propia.

El segundo penetro fue realizado dentro de la parcela situada más al este, en la línea trazada por el perfil ERT a 42 metros de su inicio y aproximadamente a 2 metros del vallado de separación de las parcelas. Las mediciones se llevaron a cabo el 28 de mayo de 2024, comenzando los trabajos a las 16:44 h y con una temperatura de 31 °C (fig.38), finalizando los mismos a las 20:19 h. En este caso, la finalización del ensayo de penetración dinámica tipo borros se debe a la llegada de la puntaza a la zona de rechazo, lo cual es coherente observando la pseudosección de resistividad (fig.45 y 46), ya que a esta altura existen materiales de resistividades más elevadas.



Figura 38. Temperatura para la segunda campaña de campo de penetración dinámica. Fuente: Google tiempo Linares

A continuación, se detallan las características y funcionamiento del equipo de penetración utilizado para la campaña de ensayos de penetración dinámica tipo borros, siendo el mismo equipo el utilizado en los dos penetros realizados.

El equipo, construido por la empresa TÉCNICAS Y CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES S.A. (TECOINSA), es un penetrómetro automático portátil para sondeos geotécnicos. Se encuentra montado sobre un carro portador, equipado con cuatro husillos para estabilidad cuando se encuentre en operación el equipo. Las características del equipo son las siguientes:

- Peso de la maza: 63,5 kg.
- Carrera de caída: 76 cm.
- Suplemento de carrera: 50 cm.
- Cuenta golpes electrónico.
- Regla graduada para control de la penetración.
- Varillas admisibles de 1 metro. Peso de cada varilla 5,727 kg.
- Motor de 5 CV con sistema hidráulico independiente.
- Gato extractor anular de 10 T con placa y enclavamiento automático.
- Central hidráulica para el accionamiento.

El procedimiento de realización del ensayo es el siguiente:

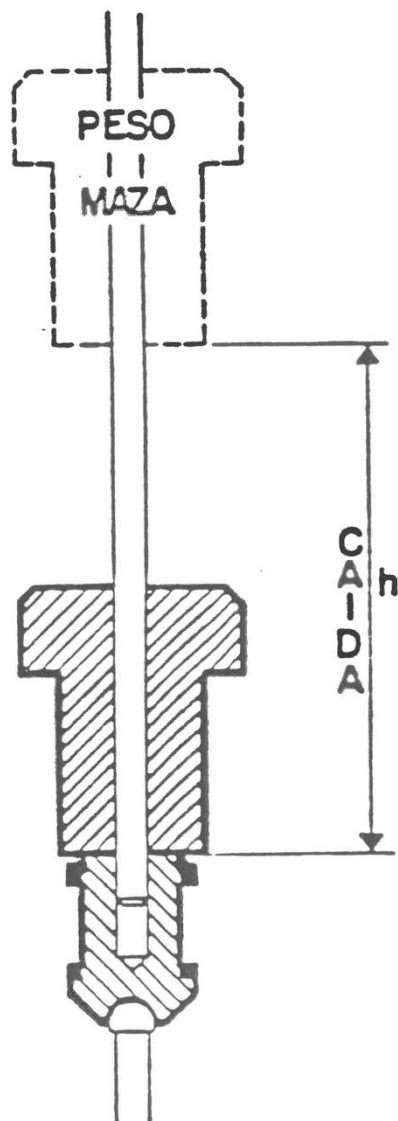
Se posiciona el equipo en el lugar que tenemos establecido para realizar el ensayo. A continuación, se enciende el motor, se libera el penetro de los anclajes de seguridad y, con la ayuda del sistema hidráulico que tiene incorporado, se eleva hasta la posición de ensayo. En este momento es necesario nivelar perfectamente el equipo mediante unos niveles de burbuja que tiene incorporados, ayudándonos de los husillos. Una vez que se encuentra el equipo en situación y perfectamente nivelado, se eleva el elemento de golpeo hasta la altura de ensayo y se procede a colocar la primera de las varillas, teniendo la misma en un extremo la puntaza acoplada y en el otro el yunque para recibir los golpes. Hay que indicar que en este caso los ensayos se han realizado con puntaza perdida. Cuando ya está todo el sistema colocado, y antes de comenzar los golpeos, es necesario marcar con una tiza el varillaje, realizando marcas cada 20 cm, para de esta forma calcular

el número de golpes que se dan en cada tramo. Una vez realizadas las marcas, comienzan los golpeos, parando cuando se llega a cada una de las marcas realizadas en el varillaje y anotando en el estadillo de campo los golpes que han sido necesario. Cuando la varilla que se está utilizando tiene aproximadamente 40 cm libres sobre el terreno, y en uno de los momentos de parada para la anotación de los golpes, es necesario acoplar una nueva varilla. Para el acople de las nuevas varillas, se levanta la cabeza de golpeo para liberar el yunque, se desacopla mediante rosca y se acopla en la parte superior de la varilla que está en el terreno una nueva, utilizando para ello un niple. A continuación, se acopla en esta nueva varilla el yunque, se desplaza de nuevo la cabeza de golpeo hasta acoplarla y se continúan con los golpeos. Todo este proceso será repetido hasta que en alguno de los tramos de 20 cm sean necesarios más de 100 golpes, llegando en ese momento a la zona de rechazo. Una vez finalizado el ensayo, bien por la llegada a la zona de rechazo, bien porque se ha alcanzado la profundidad máxima de estudio establecida previamente en gabinete o bien por la falta de varillas para poder continuar, será extraído todo el varillaje utilizado mediante un sistema hidráulico que se acopla al propio penetrómetro. Es muy importante durante el ensayo la utilización de todos los elementos de seguridad necesarios: guantes mecánicos, protecciones auditivas, botas de seguridad, etc.



Figura 39. Equipamiento completo, mecanismo de elevación, arranque del equipo, varilla y puntaza, muestra de señalización cada 20 cm, funcionamiento del equipo. Fuente: propia

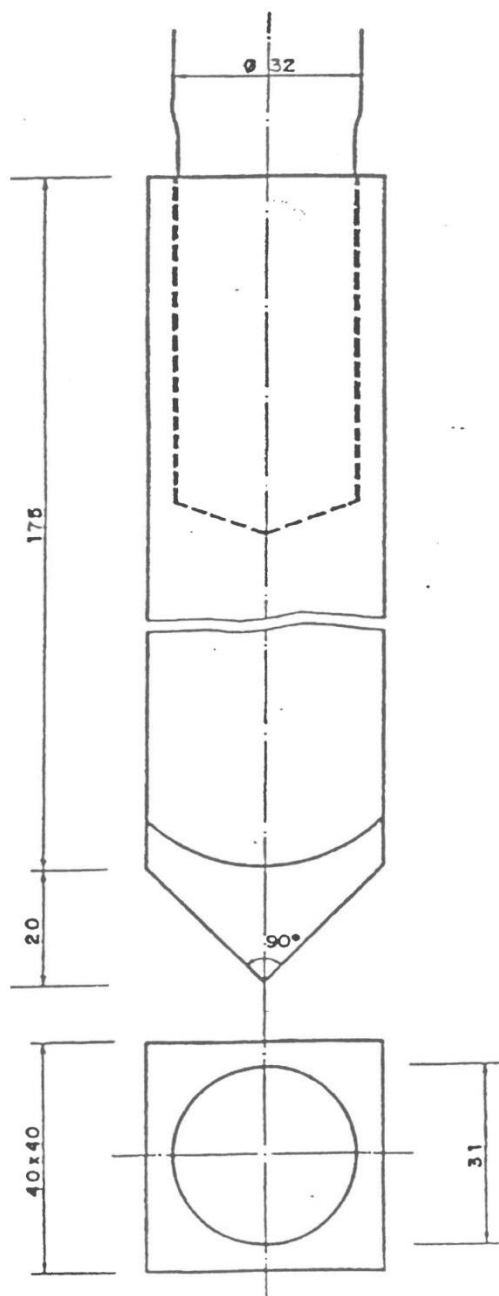
Las características del penetrómetro y de la puntaza son las siguientes (fig. 40 y 41):



PENETRÓMETRO

- Accionamiento: automático
- Peso de la maza: M: 63,5 Kg
- Caída libre: h: 500 mm
- N° de golpes por minuto: 25
- Varillaje Ø: 32 mm
- Longitud para N: 200 mm
- N es el llamado número de penetración, número de golpes por longitud determinada

Figura 40. Características del equipo de penetración dinámica



PUNTAZA

- Longitud: 195 mm
- Ángulo de vértice: 90°
- Sección: 40 x 40 mm
- Peso: 1,1 Kg
- Varillaje Ø: 32 mm
- Tipo de puntaza: Perdida, de sección cuadrada

Figura 41. Características de la puntaza para el ensayo de penetración dinámica

A continuación, se muestra el certificado de calibración del equipo de perforación (fig. 42):

TECOINSA

HOJA NUM. _____

D. EMILIANO CALLAU GRACIA, con D.N.I. nº 17.046.199,
Apoderado de la Empresa TÉCNICAS Y CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES S.A
(TECOINSA), con domicilio social en Camino Debajo la Venta nº 7, Cuarte de Huerva
(Zaragoza)

C E R T I F I C A

Que TÉCNICAS Y CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES S.A.
(TECOINSA), ha construido para Escuela Universitaria Politécnica de Linares (Jaén), un
penetrómetro automático portátil para sondeos geotécnicos, de las siguientes
características:

- ◊ Peso de la maza 63,5 Kg.
- ◊ Carrera de caída 76 cm.
- ◊ Suplemento de carrera 50 cm.
- ◊ Cuenta golpes electrónico.
- ◊ Regla graduada para control de la penetración.
- ◊ Varillas admisibles 1 mts.
- ◊ Motor de 5 Cv. sistema hidráulico independiente
- ◊ Gato extractor anular de 10 Tm. con placa y enclavamiento automático.
- ◊ Central Hidráulica para accionamiento.
- ◊ Juego de llaves dinamométricas, regulación para control de par.

Carro portador del penetrómetro, equipado con cuatro husillos para
estabilidad cuando se encuentre en operación el equipo. Este carro dispone de enganche
homologado y freno de inercia. Construido con estructura tubular galvanizada.

Con una garantía de seis meses contra todo defecto de fabricación (Nº
fabricación 96.18.35 B)

Lo que certifico a los efectos oportunos en Cuarte de Huerva (Zaragoza),
a treinta de septiembre de mil novecientos noventa y seis.



Figura 42. Certificado de calibración del penetrómetro

3.4. Nivel freático.

Atendiendo a la ejecución del primer penetro y basándonos en la humedad y los restos de lodo del varillaje en el momento de la extracción del mismo al finalizar el ensayo (fig. 43), se comprueba que el nivel freático se encuentra entre los 8-9 metros de profundidad.



Figura 43. Detalle del varillaje al alcanzar el nivel freático en el primer penetro realizado. Fuente: propia

En el penetro 2, no ha sido detectado el nivel freático en el varillaje, como si ocurre en el primer ensayo, observamos en la pseudosección de resistividad (fig.45 y 46) niveles más altos de resistividad para esta zona (Bhandari, R. 2010).

BLOQUE IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de Tomografía Eléctrica.

4.1.1. Tratamiento de los datos de campo.

Una vez que se hayan obtenido los datos de campo, se procederá al tratamiento de los mismos utilizando el software PROSYS III. La primera acción consistirá en exportar los archivos y corregir las medidas para poder representarlas gráficamente. Además, se incorporarán las cotas topográficas obtenidas del MDT025 del Instituto Geográfico Nacional.

A continuación, se llevará a cabo un filtrado de los datos, revisando aquellos valores que se encuentren fuera de la media de los valores de resistividad más cercanos. Este filtrado permitirá identificar las medidas erróneas, eliminando aquellos valores con resistividades negativas y aquellos que presenten resistividades excesivamente altas (fig. 44).

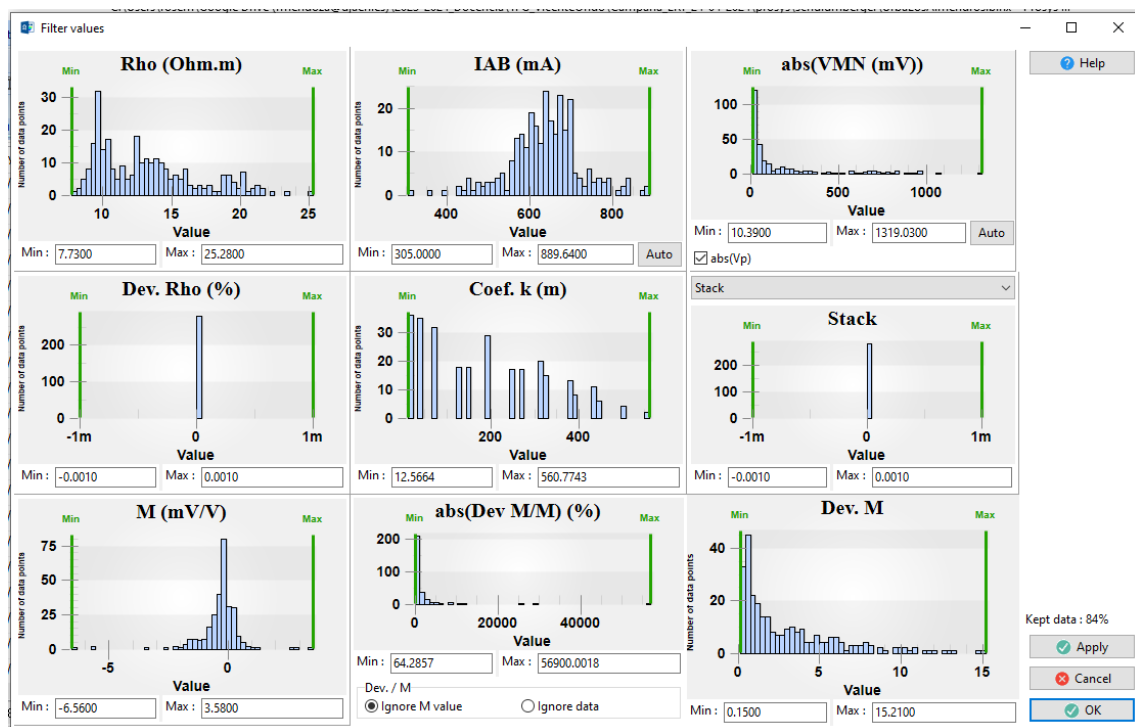


Figura 44. Representación del filtrado realizado en Prosys III

Continuando con el procedimiento, una vez filtrados los datos, se exportarán a un archivo con la extensión .dat para que puedan ser utilizados por el software RES2DINV.

Al importar los datos obtenidos de PROSYS III, se procederá al cálculo de la inversión de manera directa, dado que los filtros y correcciones necesarias ya se han aplicado durante el tratamiento de los datos.

El objetivo de la inversión es encontrar un modelo de distribución de resistividades reales en el subsuelo que responda de manera análoga a los valores de resistividad aparente medidos durante la campaña de campo. Las relaciones entre los valores de resistividad aparente y los de resistividad real del subsuelo se obtienen mediante métodos matemáticos, como elementos finitos o diferencias finitas.

Finalmente, utilizando el software Surfer, se llevará a cabo la representación de la resistividad real del perfil (fig. 45 y 46). Este proceso ha sido similar para ambas configuraciones: dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger.

4.1.2. Resultados de la resistividad real.

Los resultados obtenidos tras la campaña ERT muestra cada una de las configuraciones electrónicas (fig. 45 y 46): Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger. La escala de colores indica variaciones en la resistividad real del terreno que van desde las resistividades bajas (azul) a las resistividades más altas (rojo).

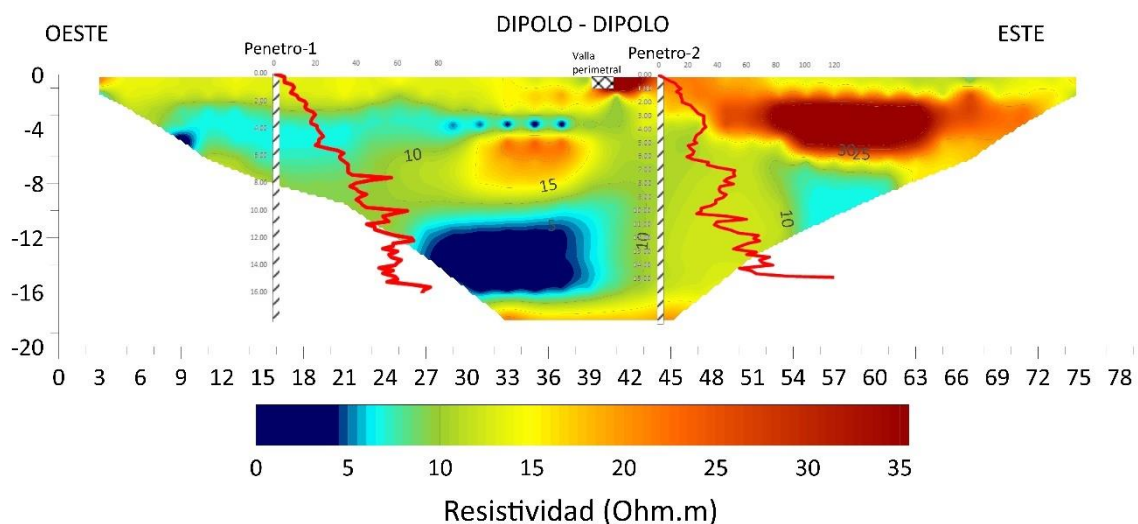


Figura 45. Perfil de resistividad real configuración dipolo-dipolo y número de golpes obtenidos en los penetros

En el perfil de la figura 45 que representa la configuración dipolo-dipolo se definen tres rangos de resistividades (observar la posición del perfil ERT en la figura 37).

- Rango de 0-8 Ohm.m: se trata de la resistividad baja en este terreno. Esta presente a los 4 metros de profundidad en la zona oeste, de los 12 a los 16 metros de profundidad en la zona central y en la zona este.
- Rango 8-15 Ohm.m: se trata de la resistividad intermedia en este terreno. Está presente a lo largo de todo perfil en la zona superficial y en profundidad en todo el perfil donde no existe zona bajas y altas de resistividad.
- Rango 15-35 Ohm.m: se trata de la resistividad alta en este terreno. Aparece de los 1-6 metros de profundidad en la zona este, de los 7-8 metros de profundidad en la zona central y a los 16 metros de profundidad a lo largo de todo el perfil. En esta zona más profunda se intuye el techo de una roca de mayor resistencia, y por lo tanto de mayor resistividad.

La presencia de un área de baja resistividad a profundidades 12 – 16 m de profundidad puede ser un indicativo de una zona potencialmente problemática, como un suelo de poca resistividad o una capa de suelo bajo la presencia de agua (Auken, E., & Lehmann, S. 2008).

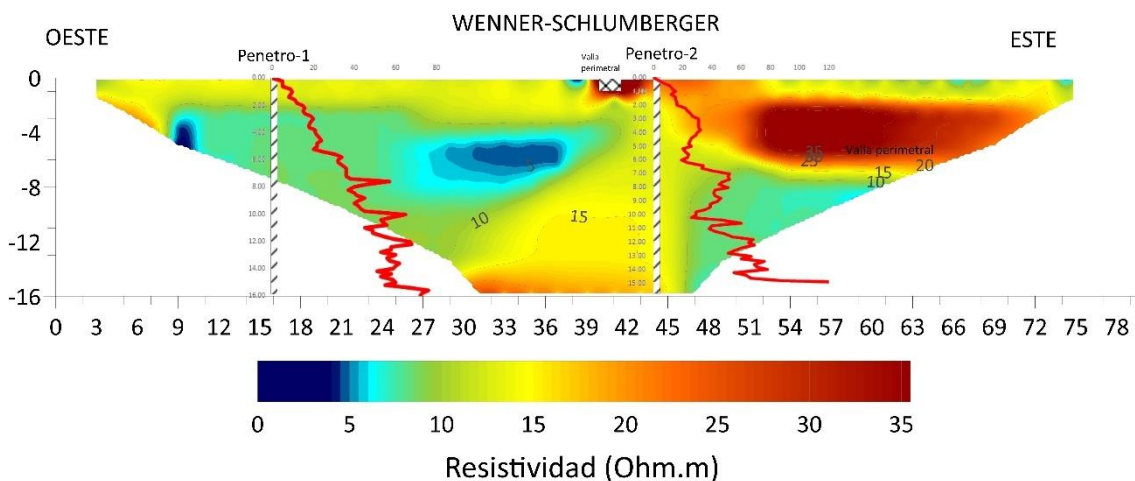


Figura 46. Perfil de resistividad real configuración Wenner-Schulumberger y número de golpes obtenidos en los penetros

En el perfil de la figura 46 que representa la configuración Wenner-Schulumberger se definen de nuevos tres rangos de resistividades, similares a la configuración dipolo-dipolo (observar la posición del perfil ERT en la figura 37).

- Rango de 0-8 Ohm.m: Esta presente entre los 4-6 metros de profundidad en la zona central desplaza al oeste.
- Rango 8-15 Ohm.m: Está presente a lo largo de todo perfil en la zona superficial y en profundidad en todo el perfil donde no existe zona bajas y altas de resistividad.

Rango 15-35 Ohm.m: Aparece de los 1-6 metros de profundidad en la zona este y a los 15 metros de profundidad a lo largo de todo el perfil. Al igual que sucede en la configuración dipolo-dipolo para esta zona más profunda central se intuye que sería el techo de una roca de mayor resistencia, y por lo tanto de mayor resistividad.

Las áreas de baja resistividad son más predominantes en el centro del perfil lo cual implicaría la presencia de materiales más conductivos como arcillas saturadas o suelos húmedos.

Esta configuración a diferencia del Dipolo-Dipolo los valores de las resistividades altas esta más acentuados mientras que los valores de resistividades bajas están mucho menos acentuados. La mayor diferencia entre los resultados de las dos configuraciones sería la zona de baja resistividad que se presenta en el centro a una profundidad de 12-14 metros para la configuración dipolo-dipolo.

4.2. Resultados Geotécnicos.

Para el ensayo de penetración dinámica, y más concretamente para el penetrometro 1 (tabla 9), se observa que no se llega al rechazo de 100 golpes para 20 cm durante los 16,00 metros de profundidad ensayados.

Tabla 9. Estadillo de campo con los resultados del penetro 1

ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA UNIVERSIDAD DE JAEN INVESTIGACION ELABORACION TFG PARAJE LOS ALMENDROS (LINARES) EXP.04/2024

PENETROMETRO N° 1
Equipo empleado: Penetrómetro “Borros” Automático
Fecha: 25/04/2024
Profundidad de rechazo: (profundidad de detención del ensayo 16,00 m)

PROFUNDIDAD (m)	N ₂₀ Borros (N° de golpes cada 20 cm)
0,00	0
0,20	5
0,40	5
0,60	5
0,80	9
1,00	10
1,20	9
1,40	8
1,60	11
1,80	12
2,00	15
2,20	16
2,40	15
2,60	16
2,80	19
3,00	20
3,20	19
3,40	18
3,60	18
3,80	21

4,00	21
4,20	22
4,40	23
4,60	24
4,80	22
5,00	22
5,20	20
5,40	25
5,60	31
5,80	34
6,00	32
6,20	32
6,40	34
6,60	36
6,80	36
7,00	36
7,20	36
7,40	38
7,60	57
7,80	47
8,00	40
8,20	37
8,40	40
8,60	41
8,80	45
9,00	42
9,20	40
9,40	42
9,60	43
9,80	45
10,00	65
10,20	59

10,40	53
10,60	54
10,80	56
11,00	45
11,20	49
11,40	49
11,60	54
11,80	59
12,00	67
12,20	68
12,40	58
12,60	58
12,80	53
13,00	60
13,20	56
13,40	57
13,60	62
13,80	60
14,00	59
14,20	51
14,40	58
14,60	53
14,80	59
15,00	60
15,20	55
15,40	67
15,60	76
15,80	73
16,00	72

En el penetro 2 (tabla 10) se puede observar que el rechazo ha sido alcanzado a una profundidad de 15 m, con 167 golpes. Si observamos el perfil de resistividades reales, (fig.45 y 46) en esta zona observamos valores altos de resistividad.

Tabla 10. Estadillo de campo con los resultados del penetro 2

ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA UNIVERSIDAD DE JAEN INVESTIGACION ELABORACION TFG PARAJE LOS ALMENDROS (LINARES) EXP.04/2024
PENETROMETRO N° 2
Equipo empleado: Penetrómetro “Borros” Automático Fecha: 25/05/2024 Profundidad de rechazo: 15,00 m

PROFUNDIDAD (m)	N₂₀ Borros (N° de golpes cada 20 cm)
0,00	0
0,20	4
0,40	7
0,60	11
0,80	13
1,00	15
1,20	12
1,40	15
1,60	15
1,80	16
2,00	16
2,20	22
2,40	23
2,60	25
2,80	27
3,00	31
3,20	31
3,40	31
3,60	31
3,80	32

4,00	30
4,20	29
4,40	26
4,60	25
4,80	24
5,00	26
5,20	20
5,40	22
5,60	24
5,80	23
6,00	19
6,20	23
6,40	34
6,60	33
6,80	40
7,00	52
7,20	51
7,40	52
7,60	47
7,80	45
8,00	51
8,20	42
8,40	41
8,60	42
8,80	46
9,00	44
9,20	39
9,40	39
9,60	36
9,80	29
10,00	29
10,20	26

10,40	47
10,60	60
10,80	40
11,00	38
11,20	42
11,40	49
11,60	54
11,80	68
12,00	65
12,20	69
12,40	61
12,60	55
12,80	51
13,00	67
13,20	60
13,40	76
13,60	69
13,80	71
14,00	78
14,20	55
14,40	63
14,60	67
14,80	89
15,00	167 (rechazo)
15,20	183 (comprobación del rechazo)

4.2.1. Gráficos de ensayos de penetración dinámica.

Los gráficos representados (fig.47 y 48) corresponden a los análisis de penetración del suelo realizado por el penetro 1 y el penetro 2. Estos estudios son esenciales para poder definir la capacidad de soportar estructuras del terreno.

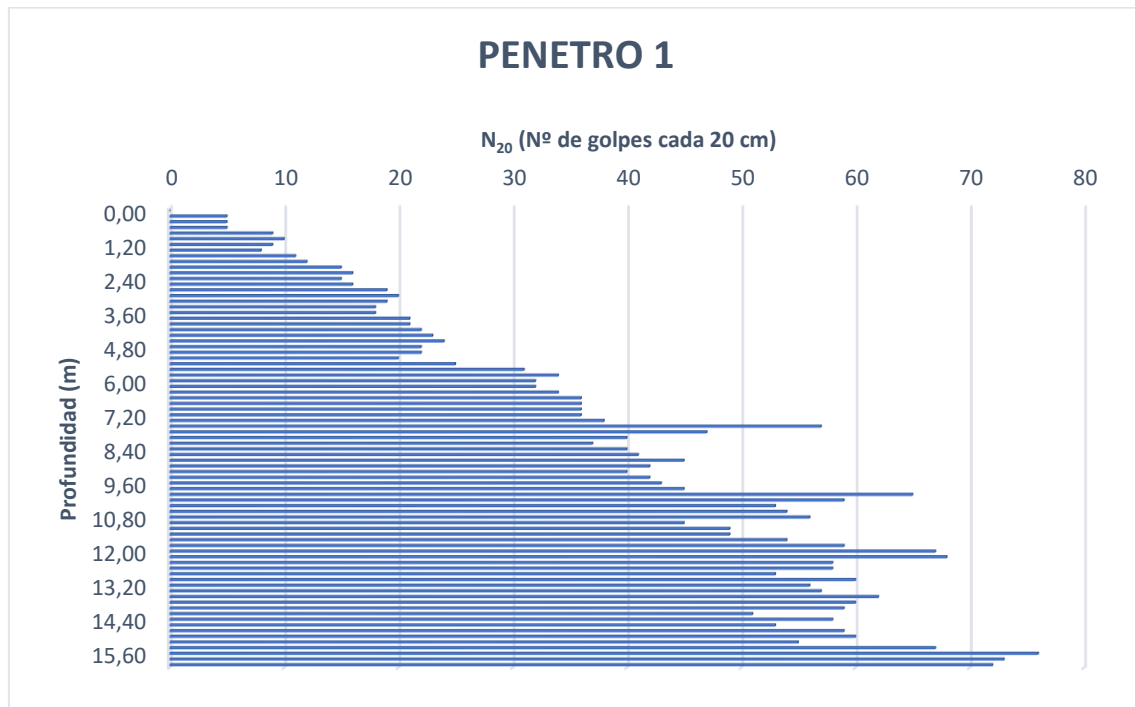


Figura 47. Diagrama de barras con los resultados obtenidos en el ensayo de penetración dinámica tipo borros. Penetro 1. Fuente: propia.

En el penetro 1 (fig.47) la evolución de los golpes se enmarca en zonas diferenciadas, aunque con incrementos más o menos constantes. Así, las mediciones realizadas de 0 a 6 m de profundidad muestran un número de golpes relativamente bajo, lo que indica que el suelo es más blando y por consiguiente más fácil de penetrar. Esto podría ser por la presencia de materiales como arenas y limos.

Al aumentar la profundidad, los valores del número de golpes tienden a incrementarse, también indicando un aumento de la resistencia del suelo que podría ser indicativo de un nivel de suelo más compacto.

Entre 6 y 10 m de profundidad, se observa un aumento del número de golpes, lo cual sugiere un cambio de material o aún más compactado. Se muestran alternancias puntuales de más golpes y menos golpes, asociadas a capas del suelo más compactas y menos compactadas.

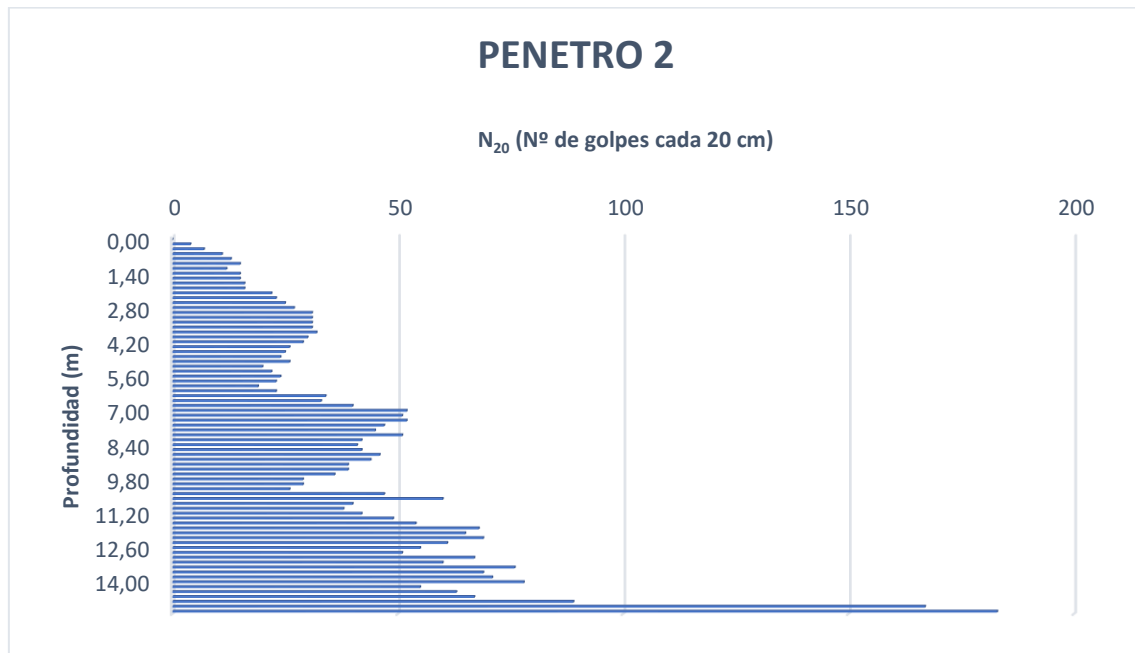


Figura 48. Diagrama de barras con los resultados obtenidos en el ensayo de penetración dinámica tipo borros. Penetro 2. Fuente: propia

En el penetro 2 (fig.48) se observa un perfil totalmente diferente al del penetro 1. En este caso, el valor del número de golpes se mantiene bajo hasta los 6 m de profundidad, lo que implica la presencia de materiales de dureza más baja.

A medida que se profundiza, se observa un aumento significativo del número de golpes, especialmente a partir de 8 m, lo cual es un indicativo que se está realizando la transición hacia materiales más compactos.

En este caso se observa que, de forma repentina a la evolución que se desarrolla en el incremento constante de golpes, a 15 metros de profundidad se llega a la zona de rechazo con 167 golpes. Este rechazo ha sido corroborado realizando una segunda medición en los 20 cm siguientes (15,20 m), con un número de golpes en este caso de 183, superior también a los 100 golpes que marcan el rechazo.

4.2.2. Cálculo de la carga admisible.

Observamos los valores de la resistencia dinámica y la carga admisible, los cuales son los encargados de garantizar que las estructuras sean seguras y estables, considerando tanto las cargas estáticas como las dinámicas que pueden actuar sobre ellas (Terzaghi, K., & Peck, R. B.1996).

En el primer penetro se observa (Tabla 11):

Entre los valores de R_d de 47,02 kg/cm² y 129,15 kg/cm², se observa un aumento progresivo en Q_a , alcanzando hasta 3,23 kg/cm². Este rango puede indicar una transición de material más blando a uno más compacto, lo que es relevante para la elección de métodos de cimentación.

A partir de 150,84 kg/cm² en R_d , la carga admisible comienza a estabilizarse, con valores que alcanzan hasta 8,35 kg/cm² en el punto más alto de resistencia dinámica (333,91 kg/cm²). Esto sugiere que el suelo ha alcanzado un nivel de compactación que permite soportar cargas más elevadas.

El valor máximo de resistencia dinámica registrado es de 333,91 kg/cm², correspondiente a una carga admisible de 8,35 kg/cm². Este punto es especialmente relevante para el diseño de cimentaciones profundas o estructuras de gran carga, ya que indica un suelo con alta capacidad de carga.

En contraste, los valores más bajos de R_d (0,00 a 47,02 kg/cm²) se asocian con cargas admisibles que no superan 1,18 kg/cm², lo que limita el uso de este terreno para estructuras pesadas.

Tabla 11. Valores obtenidos de resistencia dinámica y carga admisible para el penetro 1

PENETRO 1	
R_d (kg/cm²)	Q_a (kg/cm²)
0,00	0,00
47,02	1,18
47,02	1,18
47,02	1,18
84,64	2,12
94,05	2,35
77,49	1,94
68,88	1,72
94,71	2,37
103,32	2,58
129,15	3,23
127,03	3,18
119,09	2,98
127,03	3,18
150,84	3,77

158,78	3,97
139,94	3,50
132,57	3,31
132,57	3,31
154,67	3,87
154,67	3,87
151,11	3,78
157,98	3,95
164,85	4,12
151,11	3,78
151,11	3,78
128,70	3,22
160,87	4,02
199,48	4,99
218,78	5,47
205,91	5,15
193,68	4,84
205,79	5,14
217,89	5,45
217,89	5,45
217,89	5,45
205,67	5,14
217,10	5,43
325,65	8,14
268,52	6,71
228,53	5,71
200,16	5,00
216,39	5,41
221,80	5,55
243,44	6,09
227,21	5,68
205,48	5,14
215,76	5,39
220,89	5,52
231,17	5,78
333,91	8,35
288,54	7,21
259,19	6,48
264,08	6,60
273,87	6,85
220,07	5,50
228,66	5,72
228,66	5,72
251,99	6,30
275,32	6,88
312,65	7,82

303,42	7,59
258,80	6,47
258,80	6,47
236,49	5,91
267,73	6,69
239,39	5,98
243,67	6,09
265,04	6,63
256,49	6,41
252,22	6,31
209,24	5,23
237,96	5,95
217,44	5,44
242,06	6,05
246,16	6,15
216,91	5,42
264,24	6,61
299,74	7,49
287,91	7,20
283,96	7,10

En el segundo penetrometro se puede observar (Tabla 12):

Entre los valores de R_d de $37,62 \text{ kg/cm}^2$ y $214,35 \text{ kg/cm}^2$, se puede observar un aumento significativo en Q_a , alcanzando hasta $6,15 \text{ kg/cm}^2$. Este rango puede indicar una transición de material más blando a uno más compacto.

En el rango más alto de resistencia dinámica, se registran valores de Q_a que llegan hasta $18,04 \text{ kg/cm}^2$ en el punto máximo de resistencia dinámica ($721,73 \text{ kg/cm}^2$). Esto sugiere que el suelo tiene una capacidad de carga excepcional en estas profundidades.

El valor máximo de resistencia dinámica registrado es de $721,73 \text{ kg/cm}^2$, correspondiente a una carga admisible de $18,04 \text{ kg/cm}^2$. Este punto es crucial para el diseño de cimentaciones en terrenos que requieren soportar cargas muy elevadas, como en estructuras industriales o edificios de gran altura.

En contraste, los valores más bajos de R_d ($0,00$ a $37,62 \text{ kg/cm}^2$) se asocian con cargas admisibles que no superan $0,94 \text{ kg/cm}^2$, lo que limita el uso de este terreno para estructuras pesadas.

Tabla 12. Valores obtenidos de resistencia dinámica y carga admisible para el penetrometro 2

PENETRO 2	
Rd (kg/cm²)	Qa (kg/cm²)
0,00	0,00
37,62	0,94
65,83	1,65
103,45	2,59
122,26	3,06
141,07	3,53
103,32	2,58
129,15	3,23
129,15	3,23
137,76	3,44
137,76	3,44
174,66	4,37
182,60	4,56
198,48	4,96
214,35	5,36
246,11	6,15
228,32	5,71
228,32	5,71
228,32	5,71
235,69	5,89
220,95	5,52
199,19	4,98
178,58	4,46
171,72	4,29
164,85	4,12
178,58	4,46
128,70	3,22
141,57	3,54
154,44	3,86
148,00	3,70
122,26	3,06
139,21	3,48
205,79	5,14
199,73	4,99
242,10	6,05
314,73	7,87
291,37	7,28
297,08	7,43
268,52	6,71
257,09	6,43
291,37	7,28
227,21	5,68

221,80	5,55
227,21	5,68
248,85	6,22
238,03	5,95
200,34	5,01
200,34	5,01
184,93	4,62
148,97	3,72
148,97	3,72
127,15	3,18
229,85	5,75
293,43	7,34
195,62	4,89
185,84	4,65
195,99	4,90
228,66	5,72
251,99	6,30
317,32	7,93
303,32	7,58
307,88	7,70
272,19	6,80
245,41	6,14
227,57	5,69
298,96	7,47
256,49	6,41
324,89	8,12
294,97	7,37
303,52	7,59
333,44	8,34
225,65	5,64
258,47	6,46
274,88	6,87
365,14	9,13
685,15	17,13
721,73	18,04

4.2.3. Ensayos en laboratorio.

La recogida del material para los ensayos de laboratorio ha sido realizada el día 11 de junio de 2024. El procedimiento ha consistido en la apertura manual de una zanja, realizando recogidas de material cada 20 cm de profundidad, para un estudio en detalle del suelo. La muestra correspondiente a los primeros 20 cm (0-20 cm) ha sido recogida en la zona del penetrometro 1 (parcela situada al oeste), al existir en esta parcela una zona de relleno superficial con tierra para uso agrario, como ya se ha indicado anteriormente. En

el caso del resto de muestras recogidas (20-100 cm), corresponden a la zona del penetro 2 (parcela situada en la zona este). Esto ha sido realizado para evitar la influencia de la humedad aportada por el uso agrario en las condiciones del terreno, como se ha indicado anteriormente.



Figura 49. Campaña de recogida de material cada 20 cm para ensayos de laboratorio. Fuente: propia

4.2.3.1. Determinación de la humedad.

Los resultados obtenidos para cada nivel se muestran en la Tabla 13:

Tabla 13. Resultados del ensayo de determinación de la humedad (w) en % para diferentes profundidades

Zona de muestreo	Profundidad (cm)	w (%)
1	0-20	19,70
2	20-40	9,29
2	40-60	9,25
2	60-80	12,06
2	80-100	10,77

Se observa que la primera muestra tiene una humedad más elevada que el resto, lo cual se puede deber a las características de uso del lugar en el que se produce la recogida (zona de cultivo de hortalizas con sistema de riego). A partir de ahí, entraríamos en una zona de resistividades más altas (observar en los radiogramas) en las que, a mayor profundidad, más humedad tendremos en suelo. Eso es reflejado en la gráfica siguiente (fig.50).

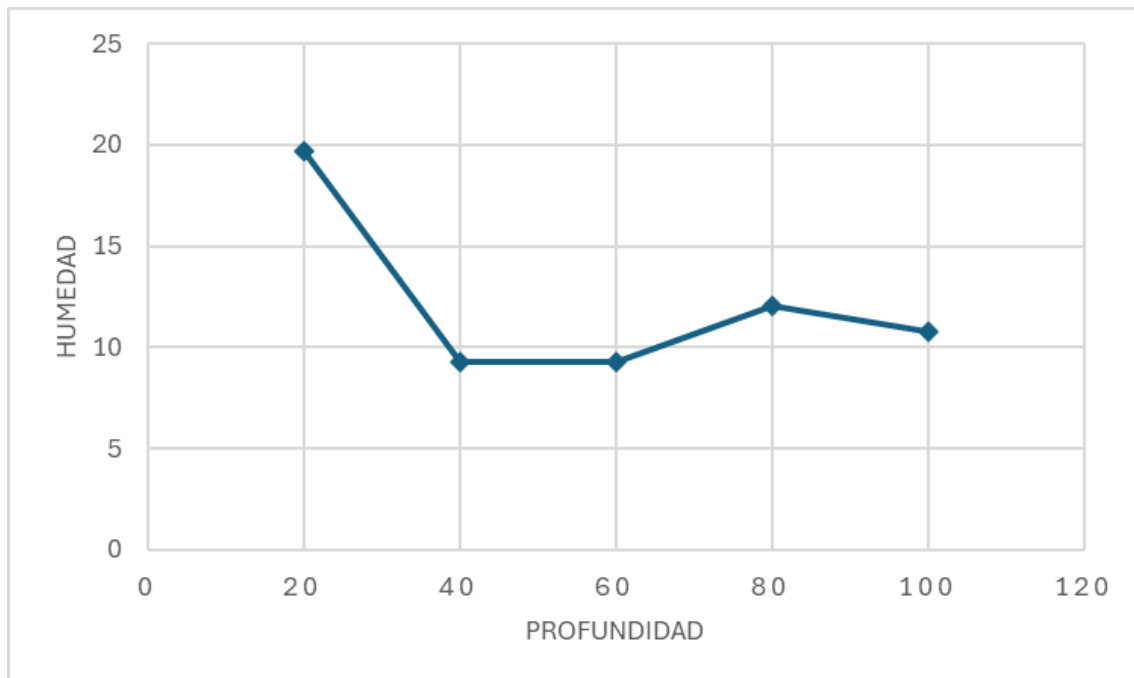


Figura 50. Representación gráfica de los resultados de humedad obtenidos en la zona de muestreo2 (20-100 cm)



Figura 51. Detalles del ensayo de determinación de la humedad: cuarteador de muestras; vidrios de reloj para muestras; muestras preparadas antes de estufa; estufa con las muestras tras el ensayo. Fuente: propia

4.2.3.2. Determinación de los límites de Atterberg.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los límites de Atterberg. Indicar que, para la obtención del límite líquido, el método utilizado ha sido el de la cuchara de Casagrande.

Tabla 14. Datos del ensayo de determinación de los límites de Atterberg

Muestra 0-20 cm

m₁	m₂	mc	w
100,47	96,20	82,90	32,03
91,60	87,50	75,20	33,33

102,80	98,60	85,60	32,30
99,17	94,70	81,20	33,03

Muestra 20-40 cm

m₁	m₂	mc	w
95,10	91,10	77,50	29,41
98,70	94,90	81,80	29,00
92,90	89,60	77,60	27,5
92,40	88,60	75,20	28,35

Muestra 40-60 cm

m₁	m₂	mc	w
95,00	90,30	77,40	36,43
86,20	83,60	69,30	18,18
96,90	93,40	81,60	29,66
96,10	91,90	78,90	32,30

Muestra 60-80 cm

m₁	m₂	mc	w
97,80	93,90	80,70	29,54
107,00	102,40	87,30	30,46
105,30	101,30	87,50	28,98
98,10	93,60	78,60	30,00

Muestra 80-100 cm

m₁	m₂	mc	w
97,80	93,20	78,80	31,94
98,30	93,90	79,10	29,72
104,00	99,20	85,60	35,29
98,60	93,90	79,30	32,20

A continuación, se muestra la representación gráfica y el valor obtenido del límite líquido (W_L) de cada muestra:

En el eje X se representan los números de golpes y en el eje Y la humedad (%).

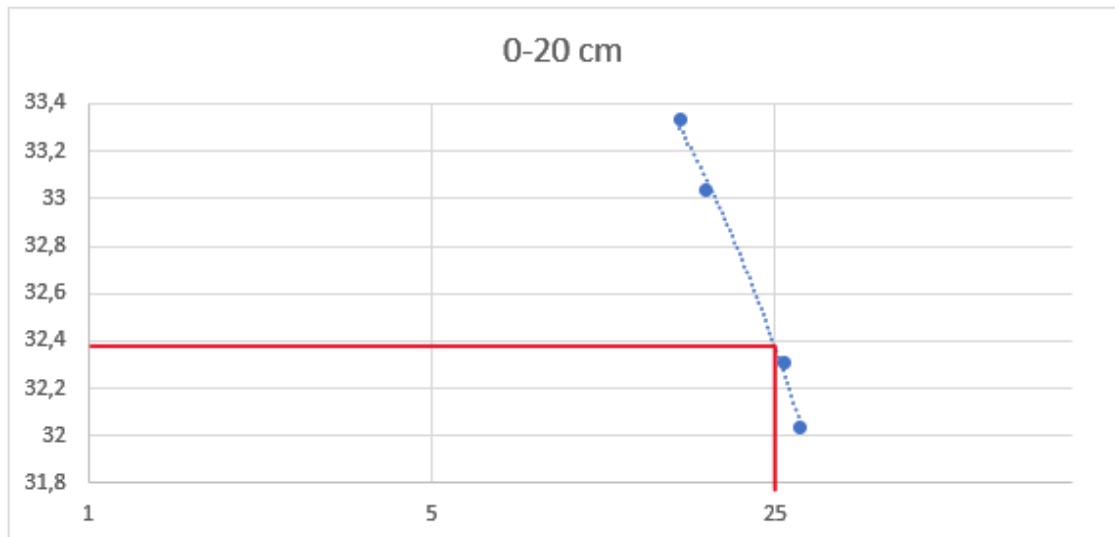


Figura 52. Representación del límite líquido para la muestra 0-20 cm. Fuente: propia.

$$W_L = 32,40$$

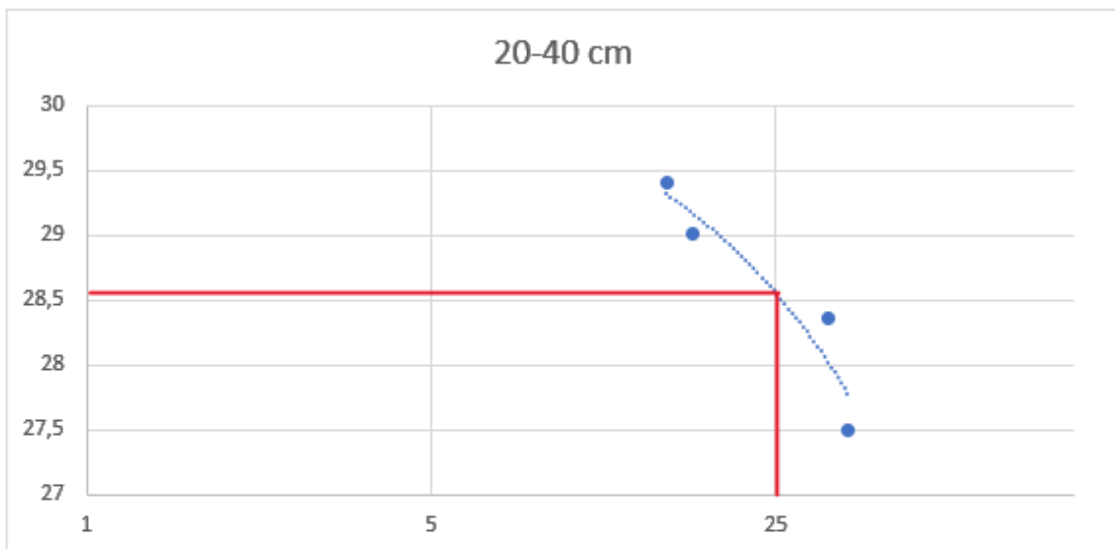


Figura 53. Representación del límite líquido para la muestra 20-40 cm. Fuente: propia

$$W_L = 28,55$$

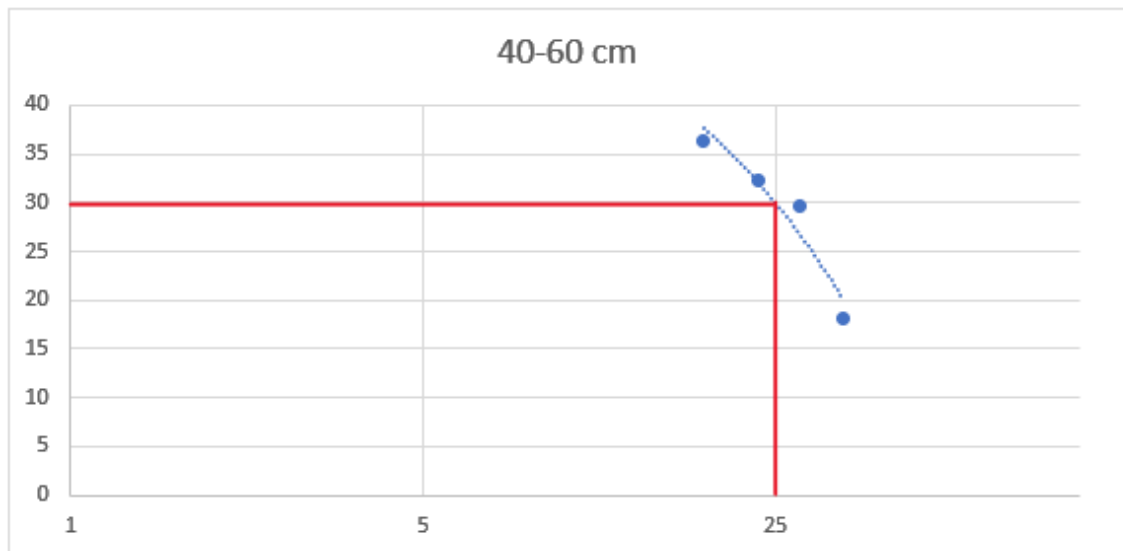


Figura 54. Representación del límite líquido para la muestra 40-60 cm. Fuente: propia

$W_L = 30,00$

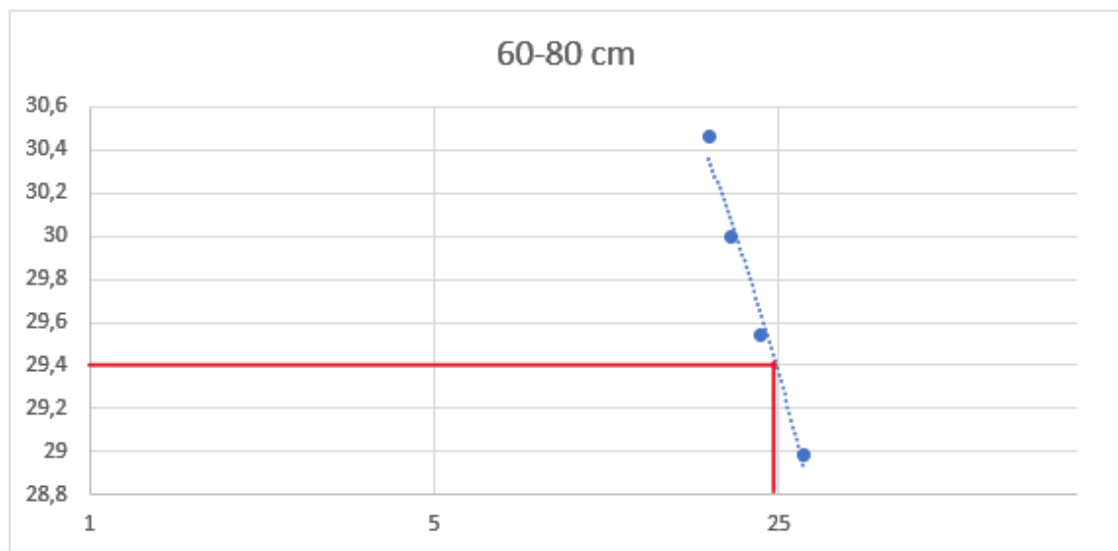


Figura 55. Representación del límite líquido para la muestra 60-80 cm. Fuente: propia

$W_L = 29,40$

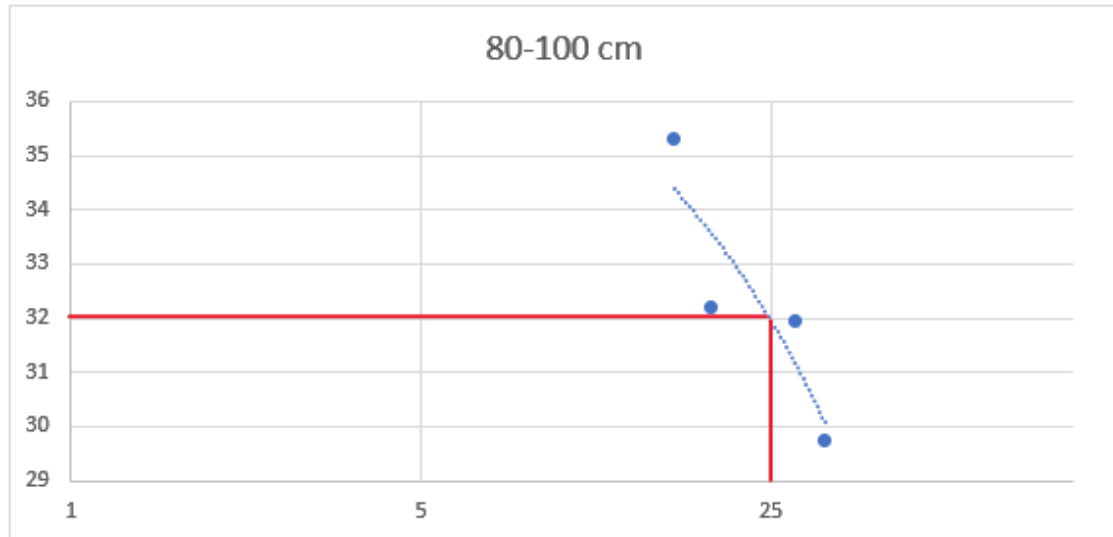


Figura 56. Representación del límite líquido para la muestra 80-100 cm. Fuente: propia

$$W_L = 32,00$$

Se puede observar que la primera muestra 0-20 cm (fig.52) y la última 80-100 cm (fig.56) son las que mayores valores necesitan para alcanzar su límite líquido.

Atendiendo a la normativa, se ha realizado el cálculo del límite plástico (W_P), siguiendo los pasos anteriormente descritos, obteniéndose:

Tabla 15. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 0-20

m₁	m₂	mc	w
98,30	96,50	88,20	21,68
91,20	90,00	84,40	21,42
		media	21,55

$$W_P = 21,55$$

Tabla 16. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 20-40

m₁	m₂	mc	w
90,80	90,40	88,20	18,18
86,90	86,60	84,40	13,63
		media	15,90

$$W_P = 15,90$$

Tabla 17. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 40-60

m₁	m₂	mc	w
89,80	98,40	87,10	17,39
89,40	88,90	85,80	20,00
		media	18,69

$$W_P = 18,69$$

Tabla 18. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 60-80

m₁	m₂	mc	w
71,80	71,40	69,30	19,04
86,60	86,30	84,20	14,28
		media	16,66

$$W_P = 16,66$$

Tabla 19. Datos para el cálculo del límite plástico de la muestra 80-100

m₁	m₂	mc	w
83,20	82,20	77,50	21,27
81,50	80,60	76,50	21,95
		media	21,61

$$W_P = 21,61$$

Se pueden observar unos resultados semejantes a los obtenidos para el límite plástico, con valores más altos para las muestras 0-20 y 80-100.

Una vez obtenidos los resultados del límite líquido y del límite plástico, se procede a calcular el Índice de plasticidad (I_P), según la fórmula:

$$I_P = W_L - W_P$$

Ecuación 13. Fórmula para el cálculo del Índice de plasticidad

Tabla 20. Resultados para el Índice de plasticidad

Muestra	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
I_P	10,85	12,65	11,31	12,74	10,39

Atendiendo a los resultados del Índice de plasticidad para las diferentes muestras estudiadas, se puede concluir que el suelo en general tiene propiedades plásticas intermedias.

En resumen, valores de $I_p < 7$ indican que el suelo es poco plástico y tiene un comportamiento más rígido y estable (Márquez y López, 2015).

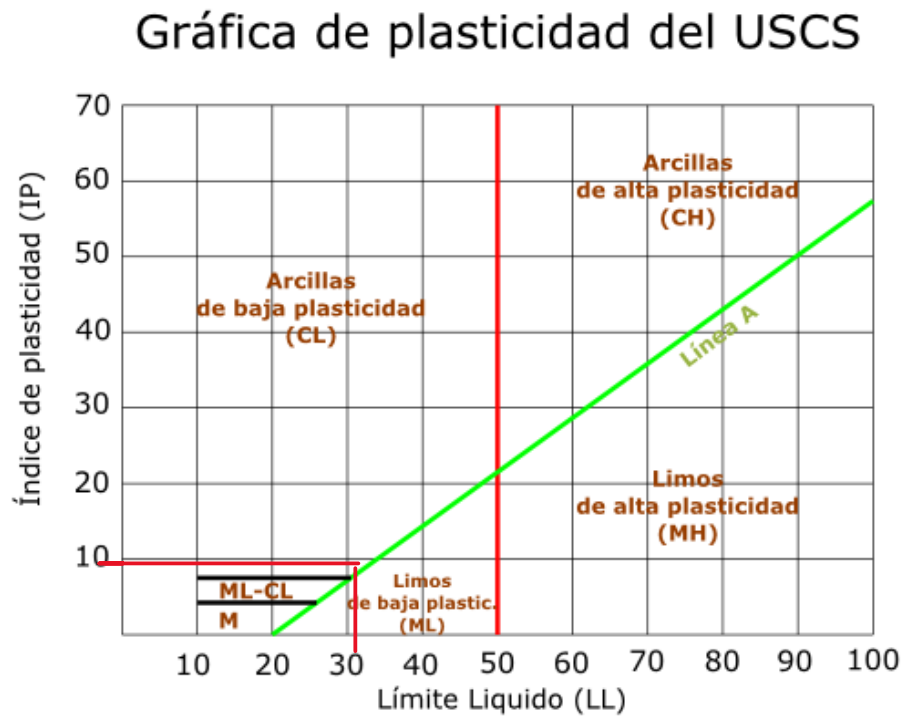


Figura 57. Gráfica de plasticidad de la muestra 0-20

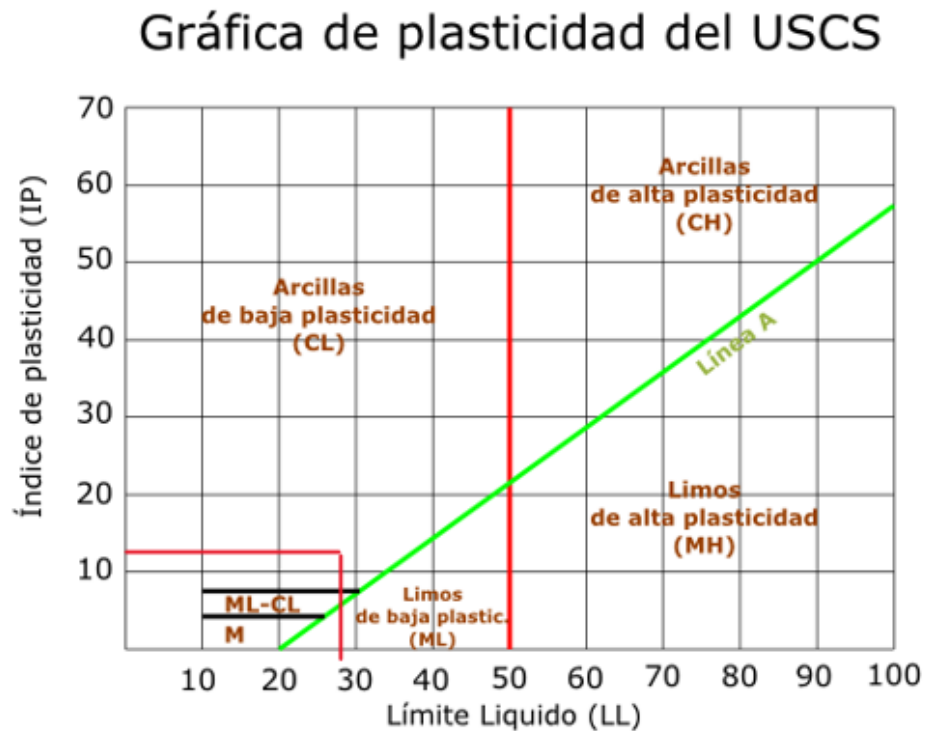


Figura 58. Gráfica de plasticidad de la muestra 20-40

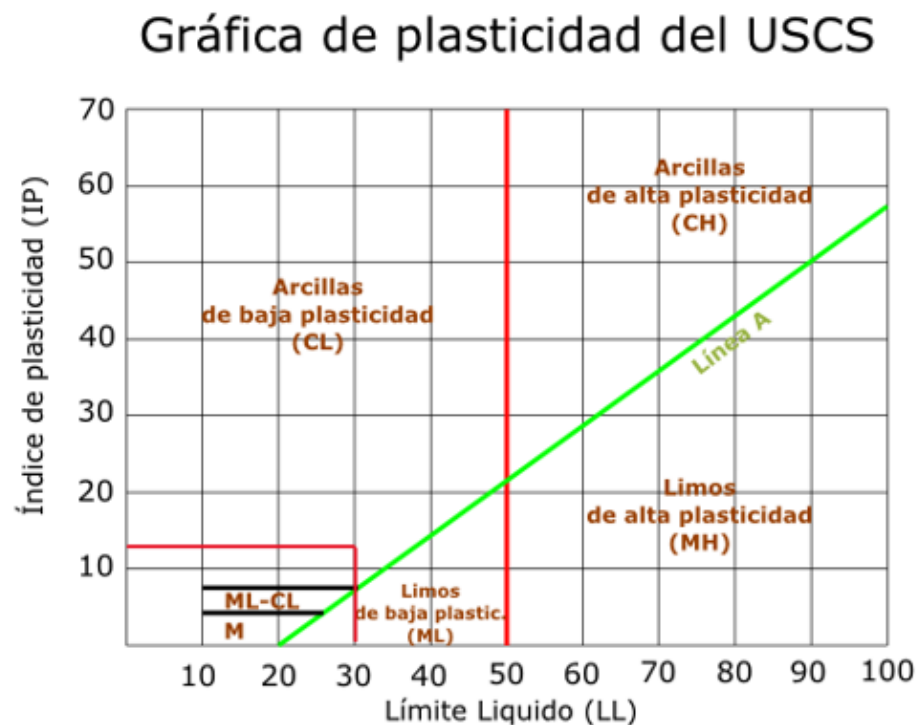


Figura 59. Gráfica de plasticidad de la muestra 40-60

Gráfica de plasticidad del USCS

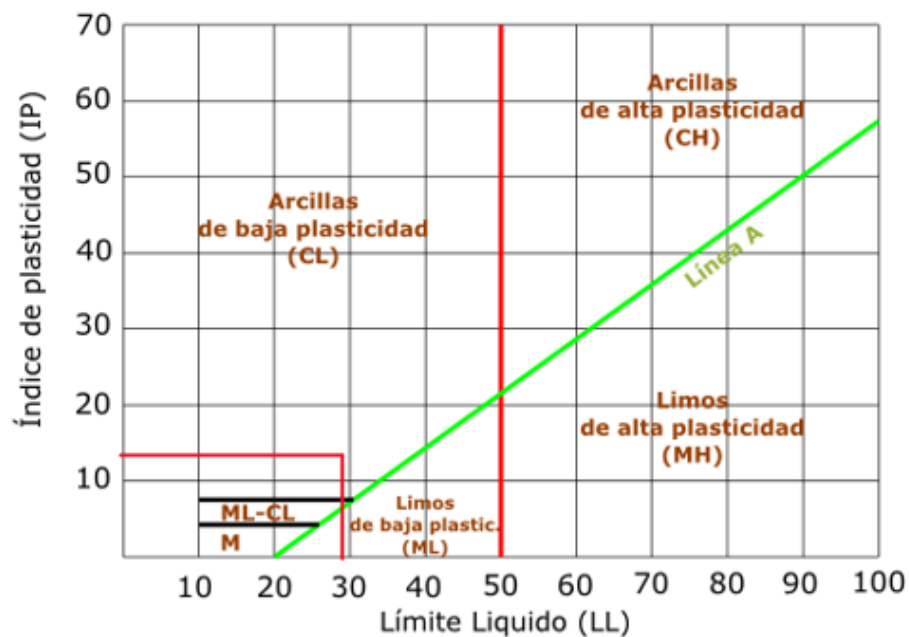


Figura 60. Gráfica de plasticidad de la muestra 60-80

Gráfica de plasticidad del USCS

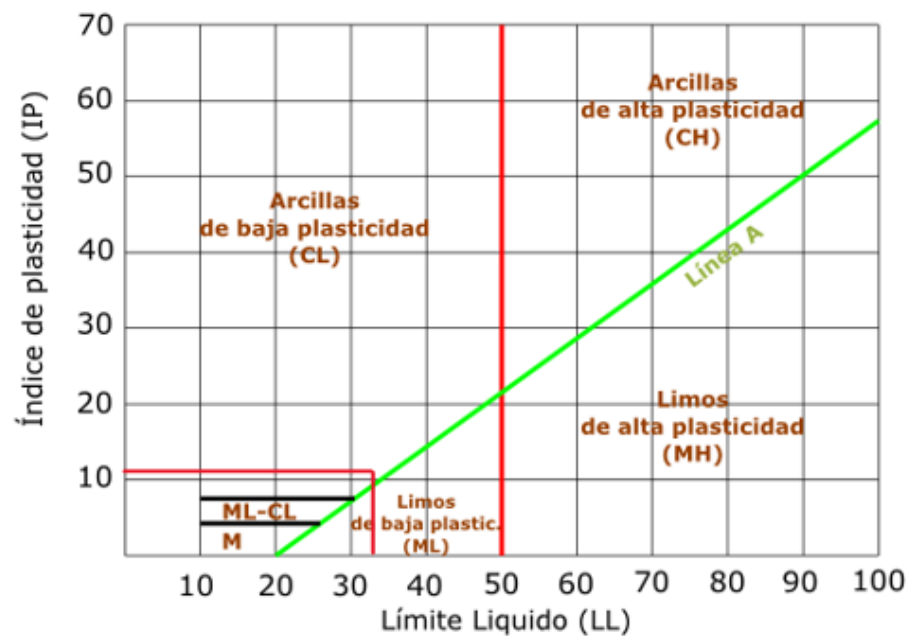


Figura 61. Gráfica de plasticidad de la muestra 80-100

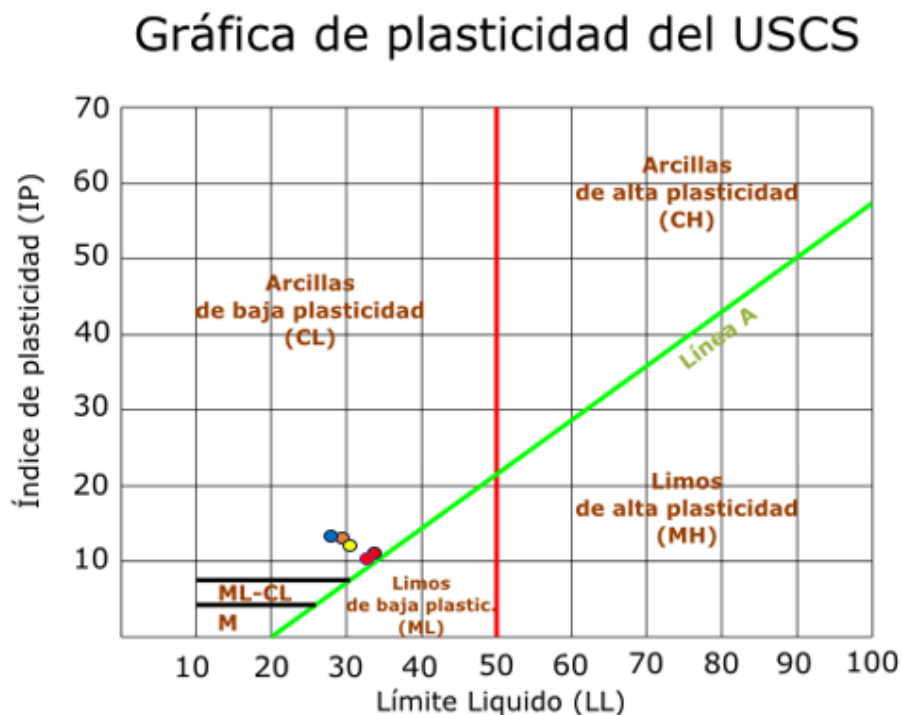


Figura 62. Gráfica de plasticidad comparativa para las diferentes muestras. 0-20 (rosa); 20-40 (azul); 40-60 (amarillo); 60-80 (naranja); 80-100 (rojo).

Atendiendo a los resultados obtenidos, se puede concluir que todos los valores se encuentran en el rango de arcillas de baja plasticidad (CL). Sin embargo, las muestras 0-20 cm (color rosa) y 80-100 cm (color rojo) (fig. 57, 61 y 62) respectivamente, se encuentran muy cercana a la “Línea A”, lo cual implica que están más cerca de tener características mecánicas de plasticidad más moderadas (Márquez y Lopez, 2015).

DIVISIONES PRINCIPALES		SÍMBOLO	COMPORTAMIENTO MECÁNICO	CAPACIDAD DE DRENAJE	Densidad óptima P.M.	CBR In situ
SUELOS DE GRANO GRUESO	Gravas	GW	Excelente	Excelente	2.00 - 2.24	60 - 80
		GP	Bueno a excelente	Excelente	1.76 - 2.08	25 - 60
		GM { d u	Bueno a excelente	Aceptable a mala	2.08 - 2.32	40 - 80
			Bueno	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
		GC	Bueno	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
	Arenas	SW	Bueno	Excelente	1.76 - 2.08	20 - 40
		SP	Aceptable a bueno	Excelente	1.60 - 1.92	10 - 25
		SM { d u	Aceptable a bueno	Aceptable a mala	1.92 - 2.16	20 - 40
			Aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
		SC	Malo a aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
SUELOS DE GRANO FINO	Limos y arcillas (I.L. < 50)	ML	Malo a aceptable	Aceptable a mala	1.60 - 2.00	5 - 15
		CL	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.60 - 2.00	5 - 15
		OL	Malo	Mala	1.44 - 1.70	4 - 8
	Limos y arcillas (I.L. > 50)	MH	Malo	Aceptable a mala	1.28 - 1.60	4 - 8
		CH	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.44 - 1.76	3 - 5
		OH	Malo a muy malo	Casi impermeable	1.28 - 1.68	3 - 5
SUELOS ORGÁNICOS		Pt	Inaceptable	Aceptable a mala	-	-

Figura 63. Ábaco para la caracterización del suelo. Fuente: AENOR

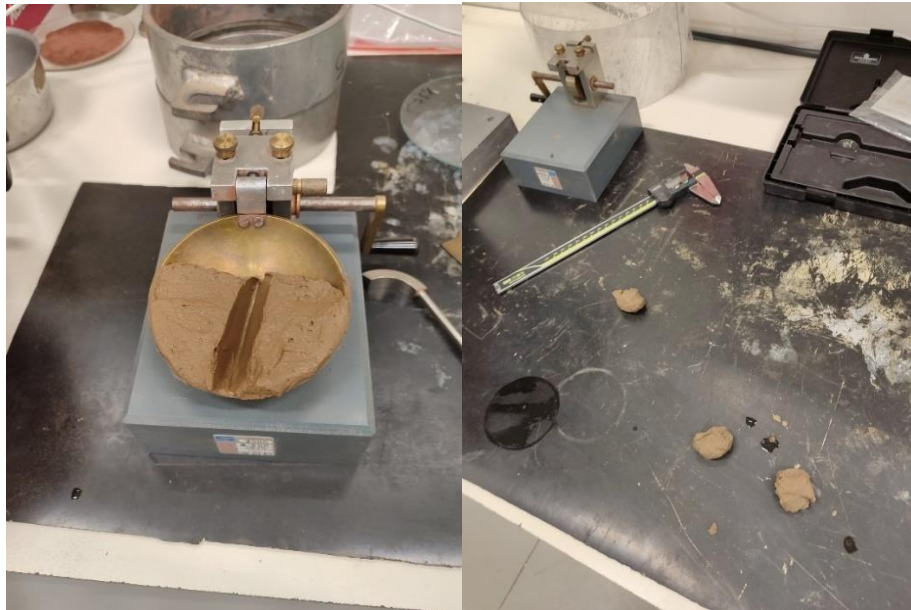


Figura 64. Diferentes pasos para la determinación de los límites de Atterberg. Fuente: propia

4.2.3.3. Análisis granulométrico.

El método utilizado ha sido el de tamizado, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 21. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 0-20

Tamices UNE	peso de tara	Tara + suelo	suelo	pasa en la muestra total	
				gr	%
25	743,4	829,2	85,8	527,7	88,19
20	720,1	746	25,9	501,8	83,8615539
10	714,2	905,1	190,9	310,9	51,9580652
5	777,6	880,7	103,1	207,8	34,7278416
2,5	692,9	740,7	47,8	160	26,7394353
2	701,8	713,5	11,7	148,3	24,7841141
1,25	682,2	701,7	19,5	128,8	21,5252454
0,8	629,2	643	13,8	115	19,2189691
0,63	624,5	629,2	4,7	110,3	18,4334982
fondo	389,7	414,1	24,4		
			527,6		

Tabla 22. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 20-40

Tamices UNE	peso de tara	Tara + suelo	suelo	pasa en la muestra total	
				gr	%
25	743,4	743,4	0	436,9	100
20	720,1	729,5	9,4	427,5	97,8484779
10	714,2	717,3	3,1	424,4	97,1389334
5	777,6	793,8	16,2	408,2	93,4309911
2,5	692,9	756,2	63,3	344,9	78,9425498
2	701,8	723,4	21,6	323,3	73,9986267
1,25	682,2	730,6	48,4	274,9	62,9205768
0,8	629,2	672,8	43,6	231,3	52,9411765
0,63	624,5	647,4	22,9	208,4	47,6997024
fondo	389,9	597,9	208		
			436,5		

Tabla 23. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 40-60

Tamices UNE	peso de tara	Tara + suelo	suelo	pasa en la muestra total	
				gr	%
25	743,4	743,4	0	703,4	100
20	720,1	720,1	0	703,4	100
10	714,2	734,2	20	683,4	97,1566676
5	777,6	852,1	74,5	608,9	86,5652545
2,5	692,9	753,2	60,3	548,6	77,9926073
2	701,8	733	31,2	517,4	73,5570088
1,25	682,2	764,2	82	435,4	61,899346
0,8	629,2	697,1	67,9	367,5	52,2462326
0,63	624,5	656,3	31,8	335,7	47,7253341
fondo	389,9	724,6	334,7		
			702,4		

Tabla 24. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 60-80

Tamices UNE	peso de tara	Tara + suelo	suelo	pasa en la muestra total	
				gr	%
25	743,4	743,4	0	780,7	100
20	720,1	720,1	0	780,7	100
10	714,2	759,9	45,7	735	94,146279
5	777,6	902,6	125	610	78,135007
2,5	692,9	822,8	129,9	480,1	61,4960932
2	701,8	740,3	38,5	441,6	56,5646215
1,25	682,2	766,3	84,1	357,5	45,7922377
0,8	629,2	699,3	70,1	287,4	36,8131164
0,63	624,5	653,1	28,6	258,8	33,1497374
fondo	389,9	648,2	258,3		
			780,2		

Tabla 25. Resultado para el análisis granulométrico de la muestra 80-100

Tamices UNE	peso de tara	Tara + suelo	suelo	pasa en la muestra total	
				gr	%
25	743,4	743,4	0	1006,9	100
20	720,1	720,1	0	1006,9	100
10	714,2	766	51,8	955,1	94,8554971
5	777,6	887,5	109,9	845,2	83,9408084
2,5	692,9	837,6	144,7	700,5	69,5699672
2	701,8	760,6	58,8	641,7	63,7302612
1,25	682,2	793	110,8	530,9	52,7261893
0,8	629,2	727,3	98,1	432,8	42,9834144
0,63	624,5	663,5	39	393,8	39,11014
fondo	389,9	783,1	393,2		
			1006,3		

Atendiendo a las tablas, se puede observar que:

- En todos los materiales, la mayoría de la muestra ensayada pasa por el tamiz UNE 25 mm, lo cual implica descartar la abundancia de gravas gruesas. Así, las fracciones que pasan por este tamiz son de materiales de menor tamaño como gravas finas, arenas, limos y arcillas. Se puede observar como en la muestra 0-20 cm (Tabla 21), hay un porcentaje significativo de muestra que se queda retenida, concretamente del 11,81%.

- Se observa además que, en la muestra 0-20 (tabla 21), correspondiente a la zona más superficial estudiada y que coincide con la capa de relleno agrícola de la parcela 1, pasa solo un 18,43% por el tamiz UNE 0,63 mm, lo cual implica que existe muy poco porcentaje de limos y arcillas, siendo este valor en las demás muestras un poco más elevado, sobre todo en 20-40 (tabla 22) y 40-60 (tabla 23), donde casi el 50% del material pasa por este tamiz (López, M, 2018).

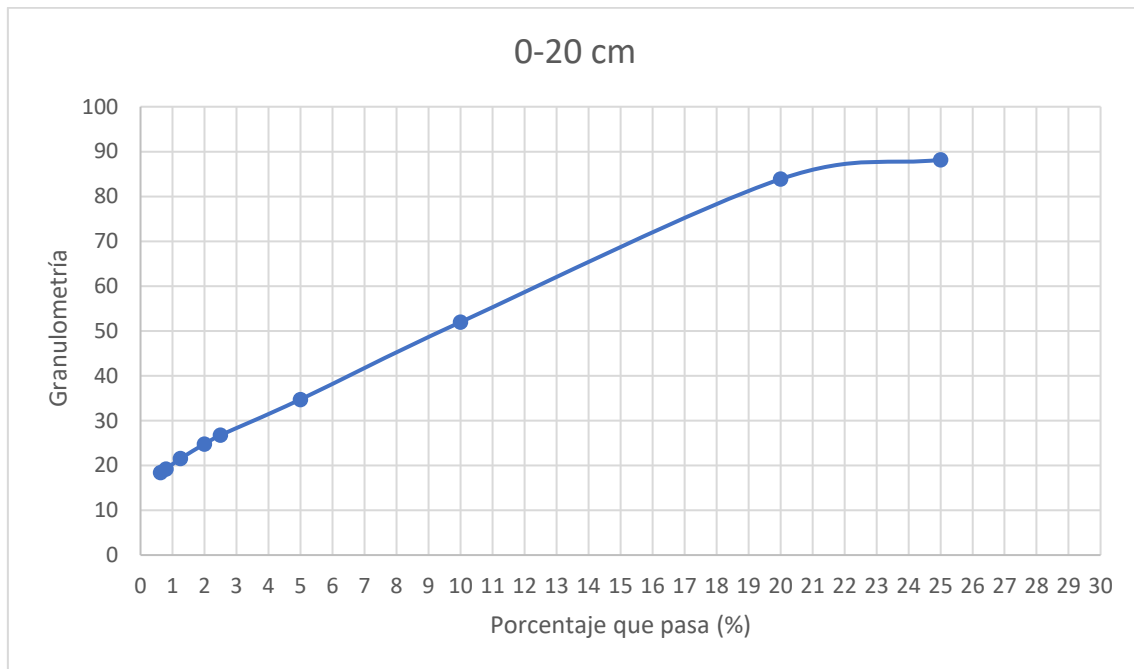


Figura 65. Curva granulométrica de la muestra 0-20. Fuente, propia.

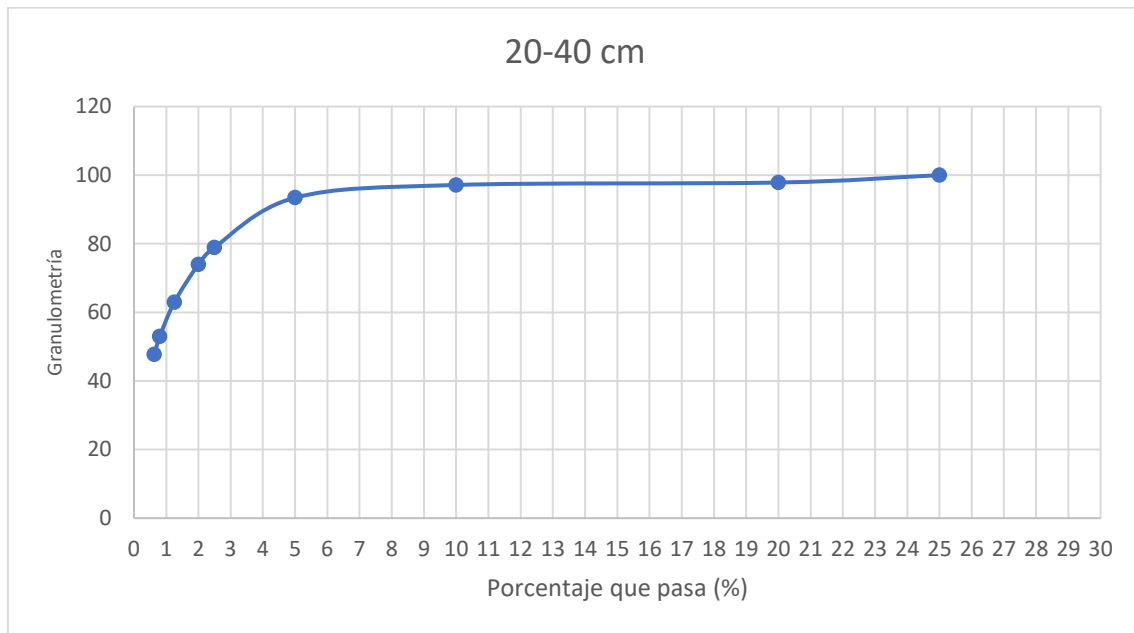


Figura 66. Curva granulométrica de la muestra 20-40. Fuente. Propia

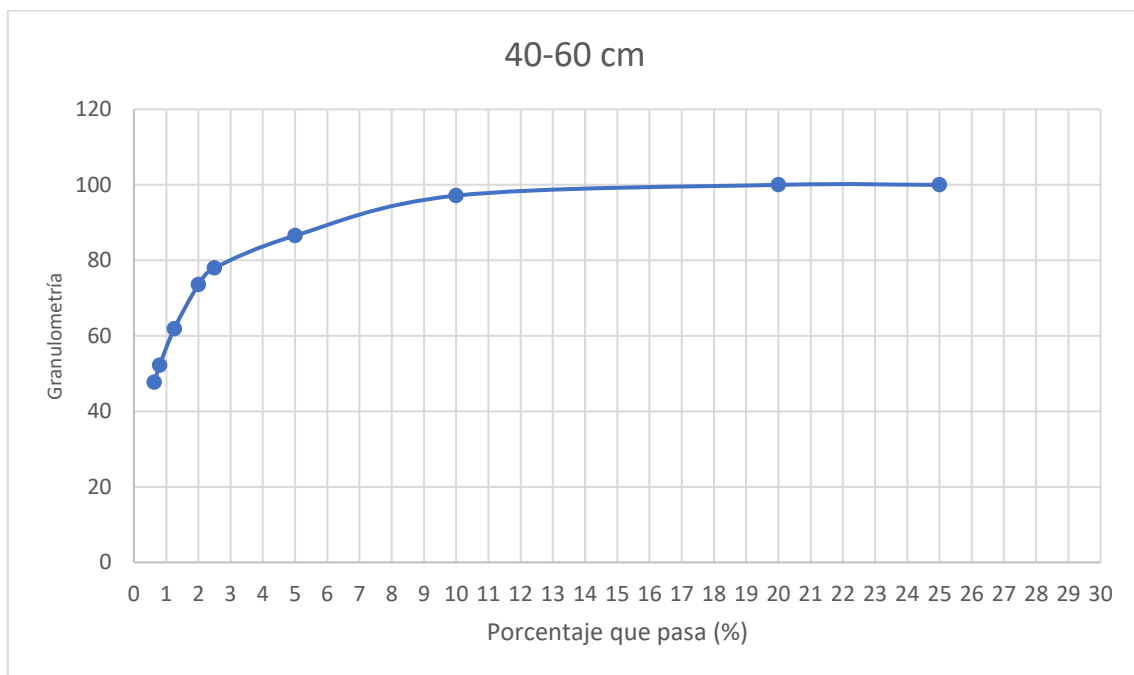


Figura 67. Curva granulométrica de la muestra 40-60. Fuente. Propia

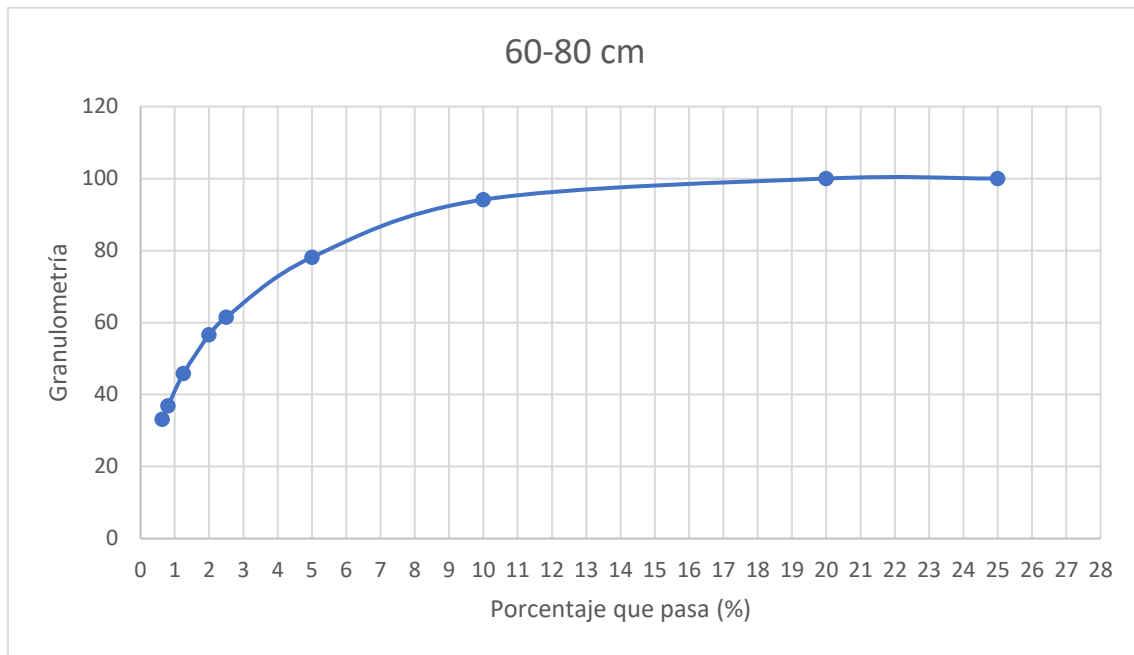


Figura 68. Curva granulométrica de la muestra 60-80. Fuente. Propia

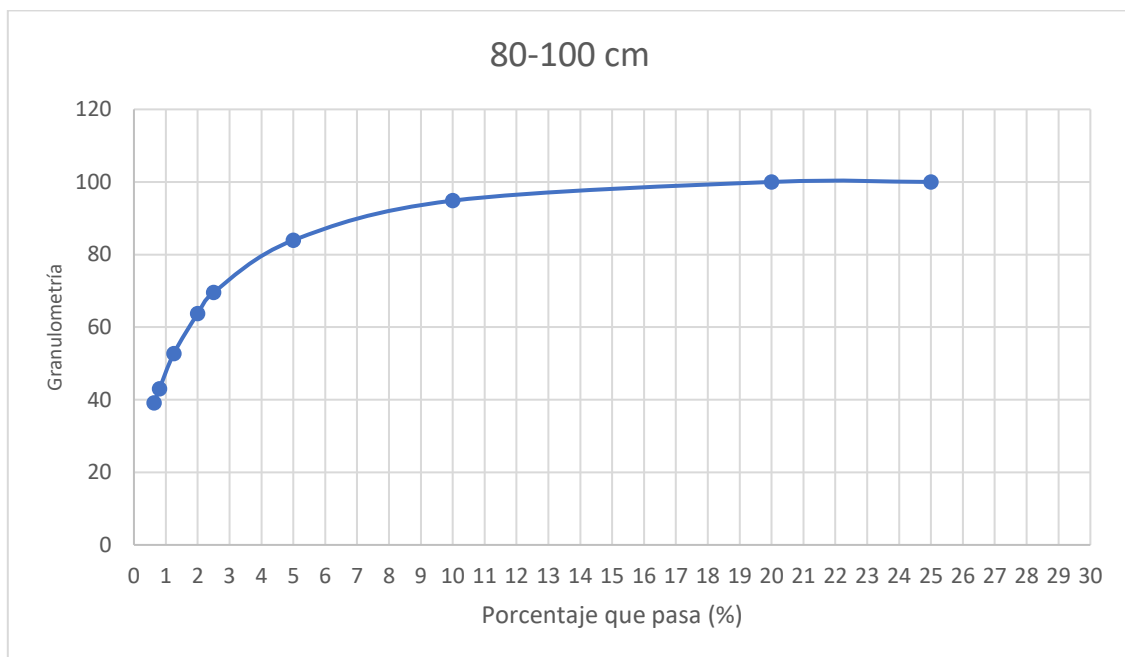


Figura 69. Curva granulométrica de la muestra 80-100. Fuente. Propia

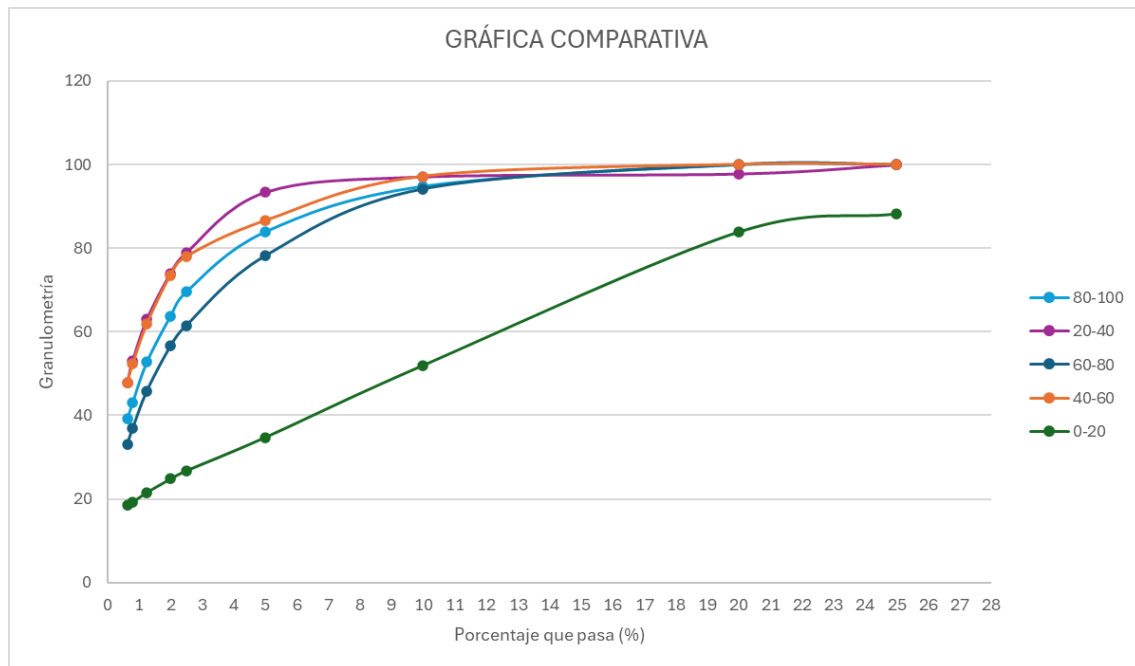


Figura 70. Comparativa de las curvas granulométricas obtenidas para todas las muestras: 0-20 (verde claro); 20-40 (morado); 40-60 (naranja); 60-80 (verde oscuro); 80-100 (azul)

Teniendo en cuenta la normativa, y las figuras anteriores, concluimos:

Muestra 0-20 (fig.65): se observa un porcentaje bajo de gravas gruesa, bajo porcentaje de grava media y un porcentaje considerable de grava fina. El material restante sería arena junto a limo y arcilla.

Muestra 20-40 (fig.66): se obtiene un bajo porcentaje de grava gruesa, bajo porcentaje de grava media pero un porcentaje superior a la anterior medida, con un porcentaje considerable de grava fina y el resto sería una mezcla entre arena, limo y arcilla.

Muestra 40-60 (fig.67): se observa un bajo porcentaje de grava gruesa, bajo porcentaje de grava media y un porcentaje considerable de grava fina, siendo el resto arena junto a limo y arcilla.

Muestra 60-80 (fig.68): se puede observar un bajo porcentaje de grava gruesa, un bajo porcentaje de grava media y un porcentaje considerable de grava fina, siendo el resto arena junto a limo y arcilla.

Muestra 80-100 (fig.69): se obtiene un bajo porcentaje de grava gruesa, un bajo porcentaje de grava media y un porcentaje considerable de grava fina.

4.2.3.4. Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe.

Los valores obtenidos se pueden comprobar a continuación (tabla 26):

Tabla 26. Resultado de la fuerza del ensayo del aparato Lambe

Muestra	F(N)
0-20	20
20-40	100
40-60	80
60-80	50
80-100	20

Se observa que los valores de las muestras 0-20 cm y 80-100 cm tienen el mismo valor de la fuerza y coincide que es el más bajo entre todos los resultados, siendo el valor de 40-60 cm el más alto.

Se procede con el cálculo del índice de hinchamiento libre, el cual es el cociente entre los valores de la fuerza y el valor de la sección de la probeta, expresada en MPa³. Se obtiene:

Tabla 27. Resultado para el Índice de hinchamiento

Muestra	Índice de hinchamiento (MPa³)
0-20	0,01
20-40	0,05
40-60	0,04
60-80	0,03
80-100	0,01

Una vez obtenidos los valores del índice de hinchamiento, se procede a dibujar la curva correspondiente para conocer el comportamiento del material.

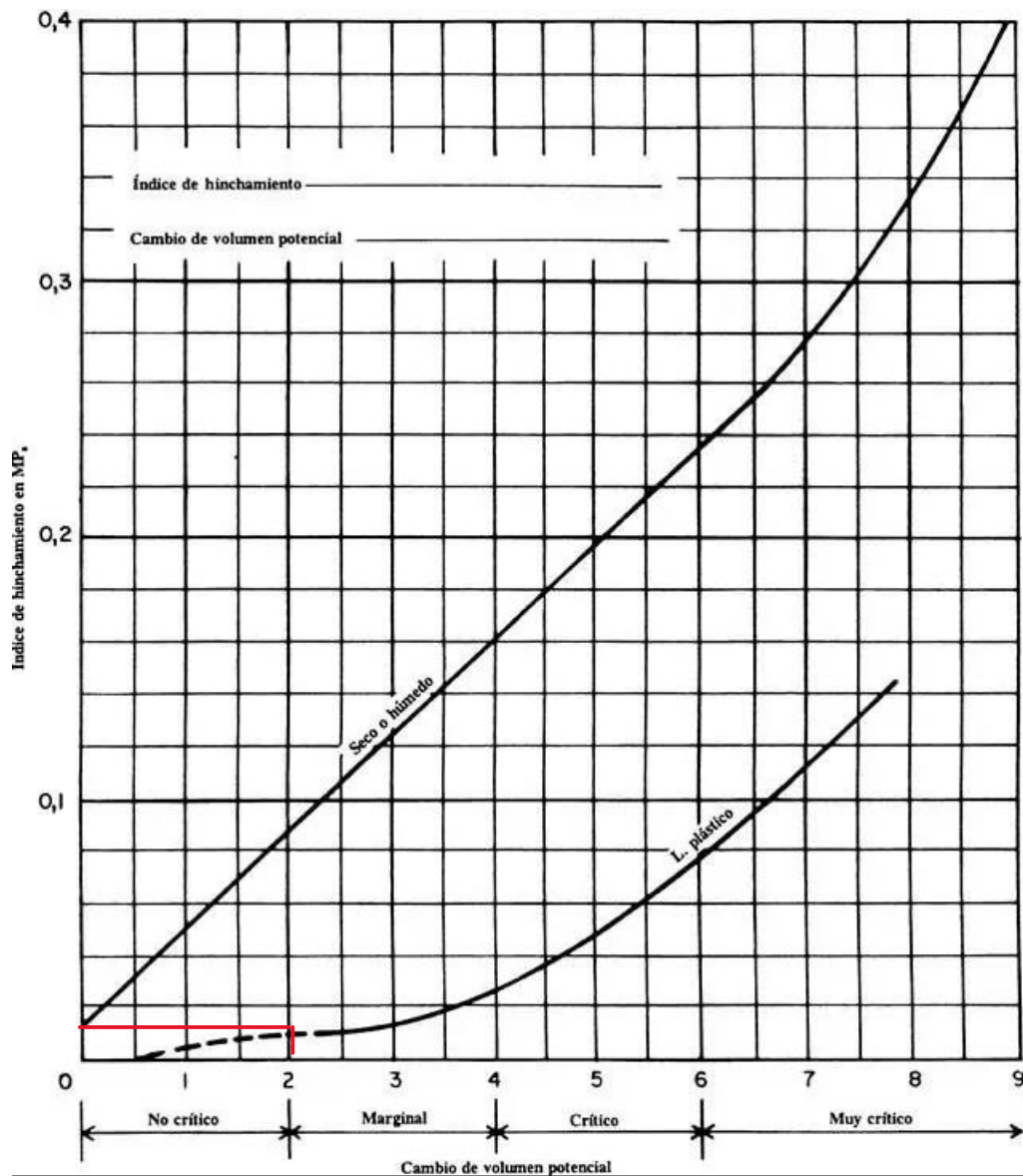


Figura 71. Representación del resultado para la muestra 0-20

La muestra 0-20 de suelo se sitúa entre el límite no crítico y el marginal.

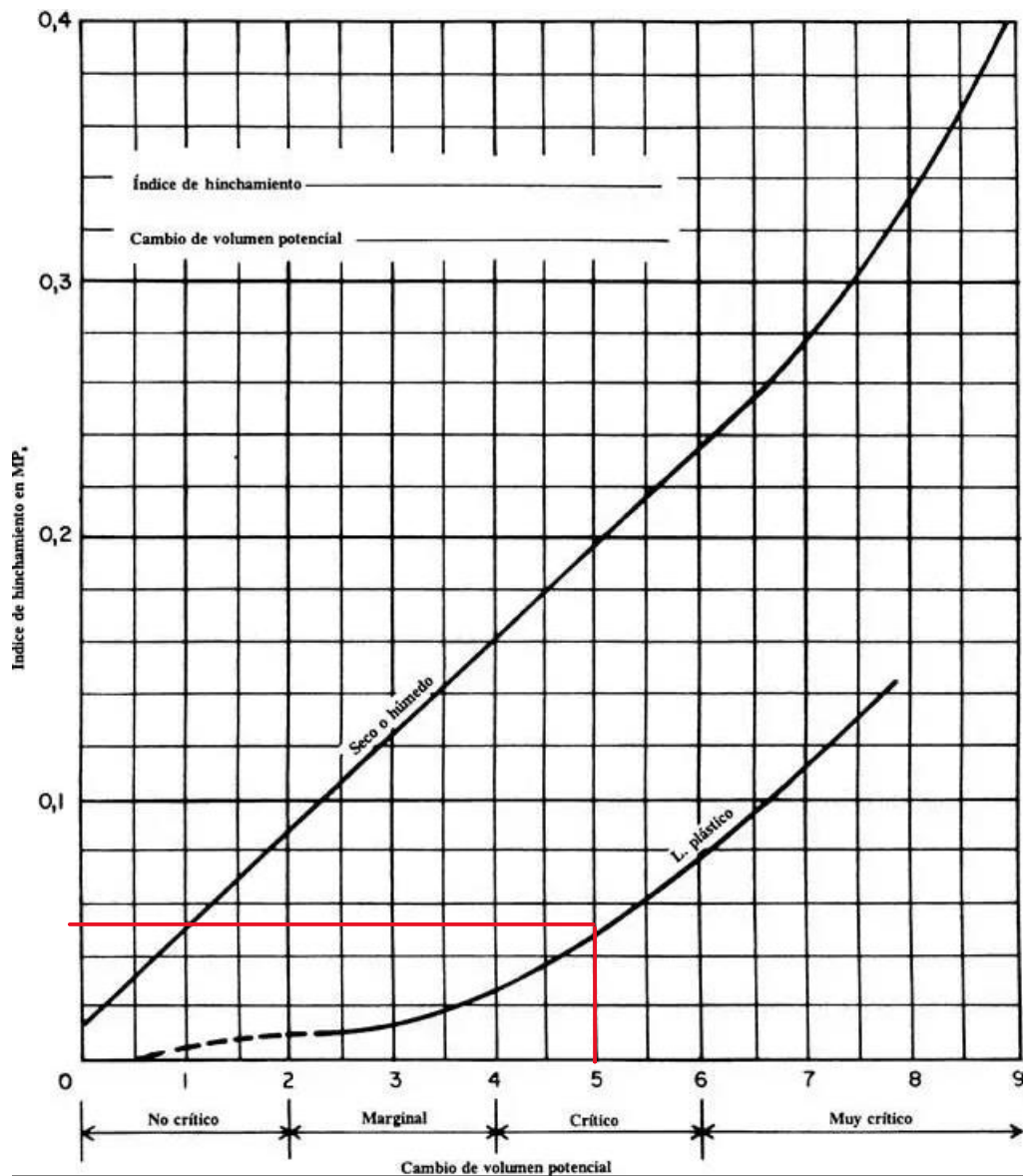


Figura 72. Representación del resultado para la muestra 20-40

La muestra 20-40 de suelo se sitúa en crítico.

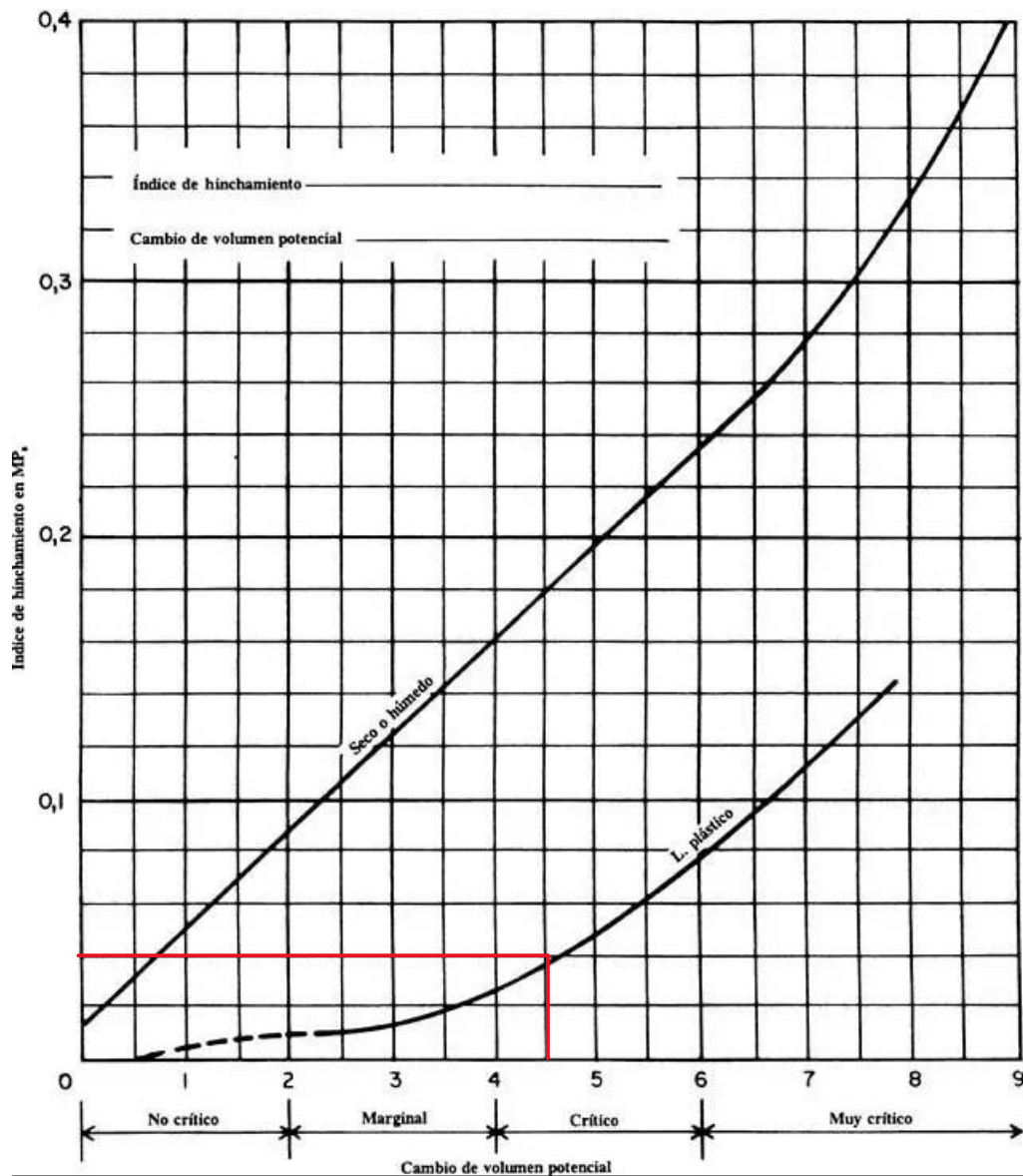


Figura 73. Representación del resultado para la muestra 40-60

La muestra 40-60 de suelo se sitúa igual que en el caso anterior, en crítico.

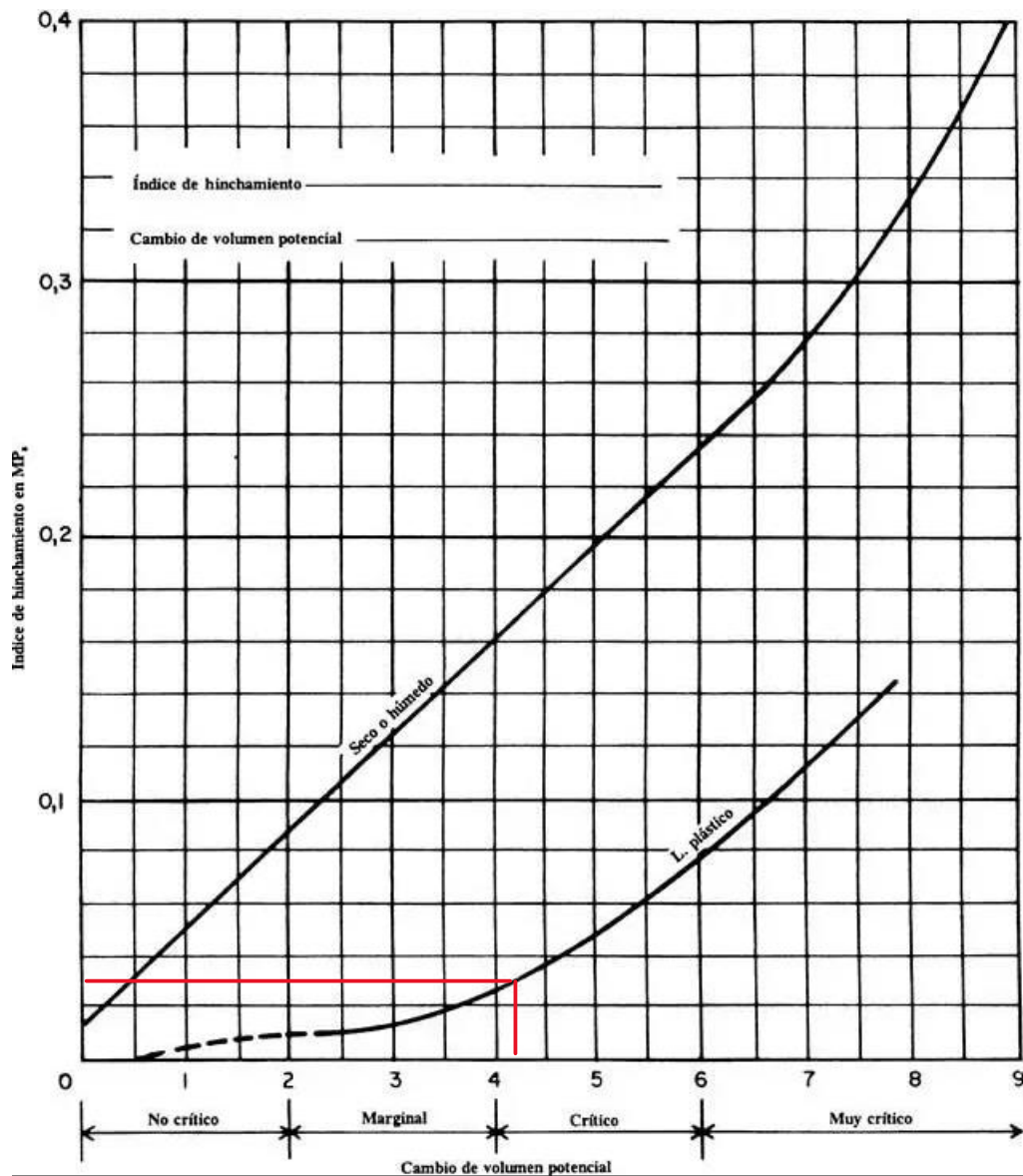


Figura 74. Representación del resultado para la muestra 60-80

La muestra 60-80 de suelo se sitúa en crítico, pero acercándose a marginal en comparación con la muestra 40-60.

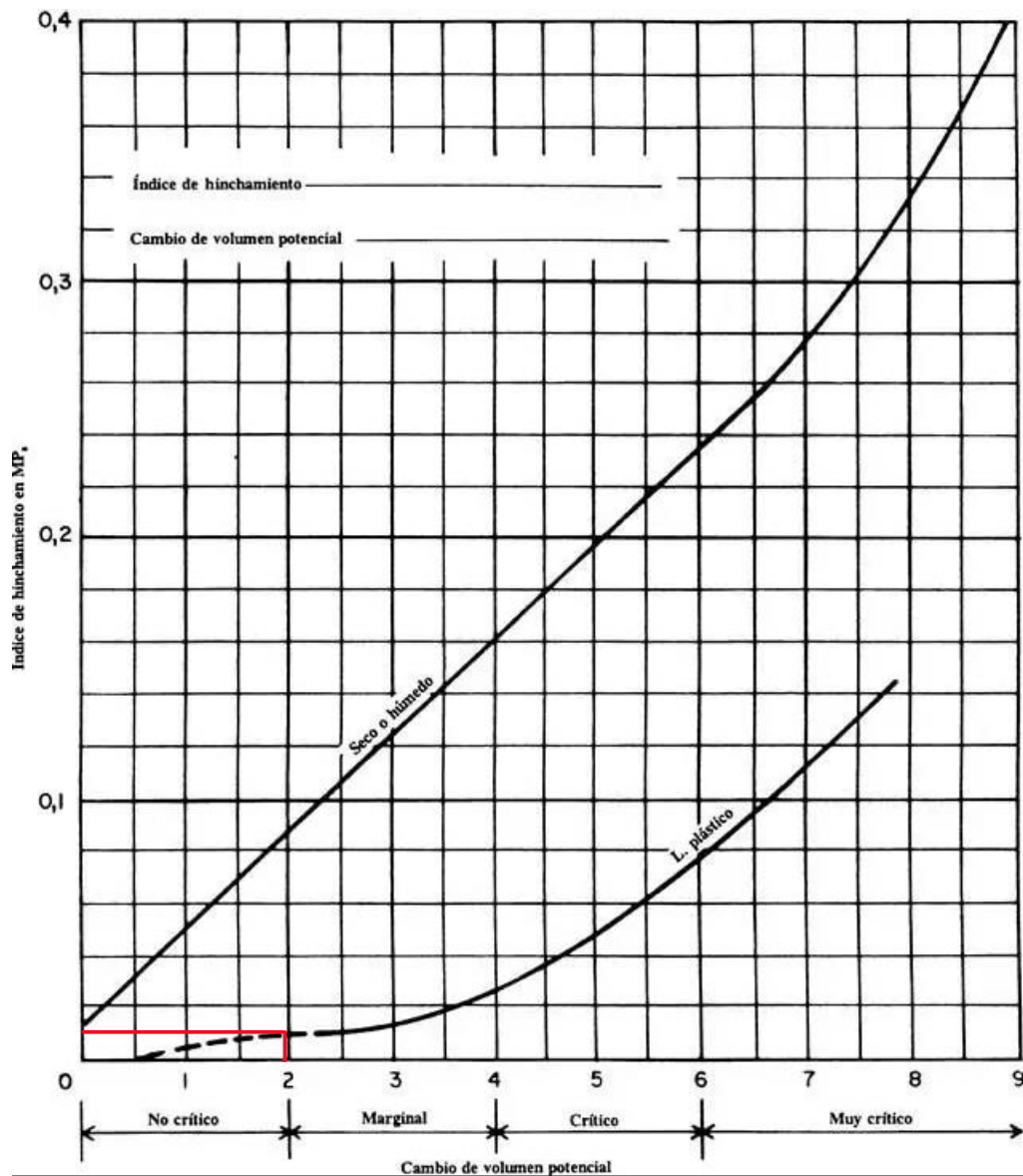


Figura 75. Representación del resultado para la muestra 80-100

La muestra 80-100 de suelo se sitúa en no crítico, aunque muy cerca de marginal.

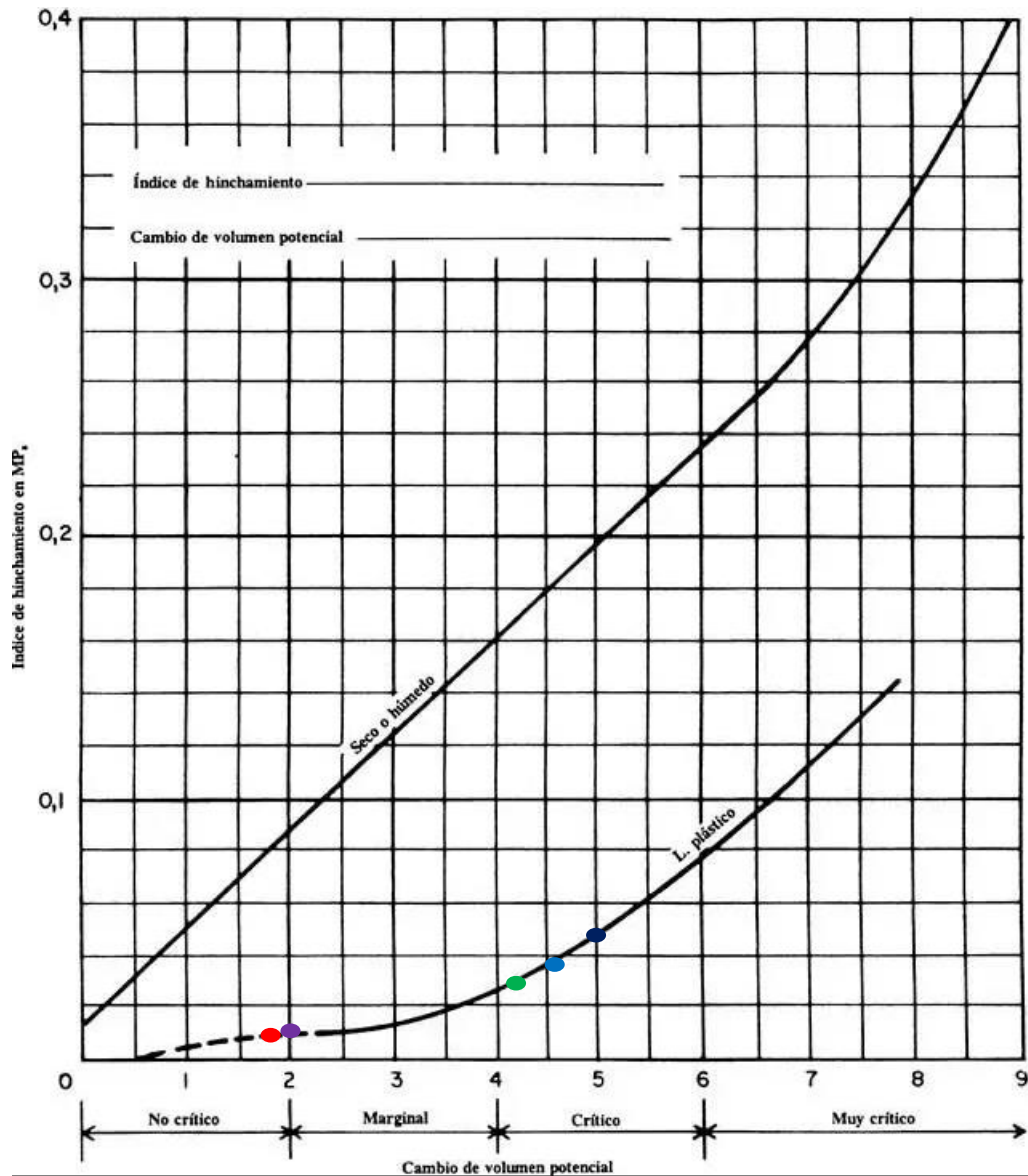


Figura 76. Resumen de los valores obtenidos para todas las muestras: 0-20 (morado); 20-40 (negro); 40-60 (azul); 60-80 (verde); 80-100 (rojo).

Como conclusión, se observa que los resultados asociados a valores de índice de hinchamiento más altos tienen como resultado peor valor en cuanto a estabilidad de suelo, obteniendo:

Muestra 0-20 (fig.71): entre no crítico y marginal.

Muestra 20-40 (fig.72): crítico.

Muestra 40-60 (fig.73): crítico.

Muestra 60-80 (fig.74): crítico.

Muestra 80-100 (fig.75): no crítico.

Donde:

- El suelo crítico tiene alta susceptibilidad a la inestabilidad como deslizamientos de tierra, baja capacidad portante y alta compresibilidad (Terzaghi, K & Peck, R.B, 1967).
- El suelo marginal esta caracterizado por tener una capacidad portante moderada, puede presentar problemas de asentamientos o deformación, requiere técnicas de mejora para su uso en construcción (Holtz, R.D & Kovacs, W.D., 1981).
- El suelo no crítico se caracteriza por tener una alta capacidad portante y baja compresibilidad, buena estabilidad y resistencia al corte, menor riesgo de falla o inestabilidad y estructura adecuada para soportar cargas pesadas sin deformaciones significativas (Bowles, J.E., 1996).



Figura 77. Detalles del procedimiento de realización del ensayo para la determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe. Fuente: propia.

4.3. Comparativa de los resultados de tomografía eléctrica y de los ensayos de penetración dinámica.

Atendiendo a los resultados de los gráficos, tanto el de ERT (fig.45 y 46) como el de los penetros (fig. 47 y 48), se podría indicar:

Penetro 1: En la configuración dipolo-dipolo la resistividad decrece entre en el tramo de 2-6 m que podría ser una zona de humedad (coincidente con la profundidad que se ha detectado nivel freático, ya que el varillaje salió húmedo y embarrado), a partir de los 6 metros la resistividad aumenta hasta los 8 metros, que es límite de datos de resistividad que alcanzamos para lo posición del penetro-1. En el caso de la configuración Wenner-Schlumberger la resistividad decrece a partir de los 2 m y se mantiene constante hasta los 8 metros, que sería el final de valores de resistividad. Observando el gráfico de número de golpes se aprecia un aumento progresivo que a los 6 metros de profundidad tiene un salto brusco. Este salto brusco coincide con el aumento de resistividad que existe en la configuración dipolo-dipolo a los 6 metros de profundidad. Por lo tanto, existe una correlación entre la técnica indirecta (tomografía eléctrica) y la técnica directa (ensayo de penetración dinámica). Además, se concluye que la baja de resistividad definida a los 2 metros de profundidad es debida a un aumento del grado de humedad de las margas, arcillas o limos; ya que el número de golpes en esta zona va en aumento y el varillaje estaba húmedo para está profundidad.

Penetro 2: para la configuración dipolo-dipolo la resistividad es alta desde superficie hasta los 3 metros de profundidad, a partir de los cuales se mantiene constante la resistividad hasta los 15 metros de profundidad que vuelve aumentar. En el caso de la configuración Wenner-Schlumberger el comportamiento de resistividades es similar.

En cuanto a la frecuencia de golpeo, se observan bajadas en el número de golpes en dos tramos, los cuales serían el tramo 3-5.8 m y el tramo 7-9.8 m con sus respectivas subidas posteriores. La bajada 3-5.8m se puede asemejar a la bajada de resistividad situada oeste de la posición del penetro-2 y la bajada 7-9.8m se puede asemejar a la bajada de resistividad situada al este de la posición del penetro-2. Por lo tanto, estas bajadas de resistividad estarían justificadas por cambio litológico de la roca y no serían por influencia de la humedad. Finalmente, la subida brusca del número de golpes llegando al rechazo también aparece en ambos perfiles de resistividad a unos 15 metros de profundidad.

Por lo tanto, se define que la bajada de resistividad presente a una profundidad de 2 metros en la zona oeste y la situada en la configuración dipolo-dipolo en la zona central a una profundidad de 12 metros son debidas a zonas húmedas. En cambio, la bajada situada de resistividad situada a los 3 metros de profundidad en la zona central-oeste y la que se encuentra a 7 metros de profundidad en la zona central-este es debida a un cambio litológico.

Finalmente destacar que en ambos perfiles de tomografía eléctrica la zona de mayor resistividad se encuentra en la zona este del perfil de 1 a 6 metros de profundidad. El número de golpes que se podrían necesitar para avanzar 20 centímetros en este tramo no es conocido al no tener realizado un penetrometro en esta zona, pero destaca que a partir de los 6 metros de profundidad existe una zona de menor resistividad y definida por un cambio litológico (no se debe a humedad), es decir, la respuesta de número de golpes sería menor al tratarse de una litología menos competente para soportar una carga.

Respecto a la configuración Wenner- Schlumberger visualiza mejor los cambios de resistividad del subsuelo en la zona central al tratarse de un dispositivo más sensible a los cambios horizontales y verticales (Koutsoftas, A. P. 2008). En cambio, la configuración dipolo-dipolo funciona mejor en los márgenes del perfil al disponer de un mayor número de medidas.

CONCLUSIONES

Para la realización de las conclusiones principales de este estudio se va a tomar como referencia el documento básico de seguridad estructural y cimientos.

Observando el resultado de la campaña ERT y los ensayos de penetración dinámica tipo borros realizados, se puede comprobar que los cambios de los valores de resistividad coinciden con la variación del número de golpes en los ensayos de penetración, siendo más alto el valor de la carga admisible conforme aumentan los valores de resistividad, llegando a obtener el valor más alto en el rechazo del segundo ensayo de penetración (Penetro 2). Además, con la correlación de las dos técnicas se puede diferenciar cuando una bajada de resistividad es debida por presencia de agua o por un cambio litológico.

Por otro lado, es importante correlacionar ambas técnicas en estudios geotécnicos, ya que la tomografía eléctrica da información tanto en profundidad como lateralmente y se visualizan cambios litológicos laterales a lo largo de la parcela. En cambio, el ensayo de penetración dinámica solo da información en profundidad y no lateralmente, no obteniendo estos cambios laterales.

En referencia a los ensayos de laboratorio, se puede comprobar de forma general como, a medida que se aumenta la profundidad, las características que se presentan resultan en una mayor calidad del terreno para trabajos de edificación. Como es lógico, y debido a la peculiaridad de la franja más superficial de la parcela número 1 (0-20 cm), en la que se presentan materiales de relleno para labores agrícolas, los resultados se desvían de la concordancia del resto.

Basándonos en el resultado del tipo de terreno, el cual no posee unas características de muy buena calidad, y tomando como referencia el documento básico de seguridad estructural y cimientos, podemos concluir que la mejor opción para elaborar la cimentación de una futura construcción es el uso de losa, teniendo en cuenta que:

- Proporcionan una base estable y sólida, reduciendo el riesgo de asientos diferenciales, los cuales pueden dañar la estructura.
- Son eficientes para distribuir cargas de manera uniforme al terreno, especialmente en suelos con baja capacidad de carga.
- Las losas pueden ser prefabricadas o vertidas in situ, lo que permite una construcción más rápida en comparación con otros tipos de cimentaciones como los pilotes y las zapatas.

BIBLIOGRAFÍA

Auken, E., & Lehmann, S. (2008). "Resistivity imaging for environmental and engineering studies." *Geophysical Prospecting*, 56(2), 245-26.

Pellicer Jiménez, E. (2015, Julio). Caracterización mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de Toleo (Oviedo) para la elaboración del TFM. Universidad de Oviedo.

Solana Capolla, M. (2014, septiembre). Comparación de técnicas geofísicas para determinación de contaminación de suelos agrícolas para elaboración de TFG. Escuela técnica superior de ingenieros de minas.

Maldonado, Y. (2020, Julio 27). Límites de Atterberg y el índice de plasticidad. GEOLOGIAWEB.<https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/limites-atterberg/>.

TERRATEST. (2020, septiembre). Informe de los trabajos de reconocimiento geotécnico en paseo Virgen de Linarejos n° 38.

Aizawa, T. (2014): *Application Manual of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems*.

European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), Society of Exploration Geophysicists of Japan (Eds.), The Netherlands.

Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.

Craig, R. F. (2004). *Soil mechanics* (7th ed.). Spon Press.

Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.

Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Wiley.

Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.

Meyerhof, G. G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 82(SM2), 1-19.

- Ladd, C. C. (1991). Stability evaluation during staged construction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(4), 540-616.
- Bowles, J. E. (1997). *Physical and geotechnical properties of soils*. McGraw-Hill.
- Cernica, J. N. (1995). *Geotechnical engineering: Soil mechanics*. Wiley.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. Wiley.
- Schofield, A. N., & Wroth, C. P. (1968). *Critical state soil mechanics*. McGraw-Hill.
- Sowers, G. F., & Sowers, V. E. (1995). *Introductory soil mechanics*. Macmillan.
- Coduto, D. P. (1999). *Geotechnical engineering: Principles and practices*. Prentice Hall.
- Smith, M. (2002). *Geotechnical engineering: Principles and practices*. Wiley.
- Atkinson, J. H. (2000). *An introduction to soil mechanics*. Wiley.
- Lee, J. (2005). Soil behavior and its implications for geotechnical engineering. *Geotechnical Testing Journal*, 28(3), 309-318.
- Reddy, K. R., & Reddy, R. (2009). *Advanced soil mechanics*. Taylor & Francis.
- Roulac, J. (2007). Soil behavior and the design of foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(8), 1033-1045.
- Puri, A. (2011). *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning.
- Chern, J. C., & Lee, J. (2010). *Soil mechanics: Principles and practice*. Springer.
- Hight, D. W., & McCarthy, M. (2004). The role of soil testing in geotechnical engineering. *Geotechnical Engineering*, 157(2), 75-85.
- Reddy, K. R. (2007). *Soil mechanics and foundation engineering*. Springer.
- Juran, J. M. (1999). Quality control and quality improvement in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 125(11), 893-898.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The finite element method* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

- Koutsoftas, A. P. (2008). *Geotechnical engineering: A practical approach*. Wiley.
- Boulanger, R. W., & Ziotnick, C. (2008). Seismic liquefaction and its effects on foundation design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6), 837-844.
- Ranjan, G., & Rao, A. S. (2000). *Basic and applied soil mechanics*. New Age International.
- Valsangkar, A. B. (2005). *Soil mechanics: Theory and practice*. PHI Learning.
- Barlow, J. W. (1999). *Geotechnical engineering: Principles and practice*. Wiley.
- Sweeney, J. (2003). *Soil mechanics: A comprehensive guide*. Academic Press.
- Garga, V. (2011). *Soil testing for engineering purposes*. Wiley.
- Bhandari, R. (2010). *Geotechnical engineering: A practical guide*. Springer.
- Sowers, G. F. (2005). *Soil mechanics*. Macmillan.
- Pande, G. N., & Ghosh, A. (2007). *Geotechnical engineering: A practical approach*. Wiley.
- Barlow, J. (2000). *Geotechnical testing: Principles and practice*. Wiley.
- Reddy, K. R. (2011). *Geotechnical engineering: Principles and practices*. Cengage Learning.
- Boulanger, R. W., & Ziotnick, C. (2008). Seismic liquefaction and its effects on foundation design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6), 837-844.
- Craig, R. F. (2004). *Soil mechanics (7th ed.)*. Spon Press.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering (7th ed.)*. Cengage Learning.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1996). *Soil mechanics in engineering practice (3rd ed.)*. Wiley.

Meyerhof, G. G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of soils. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 82(SM2), 1-19.

Ladd, C. C. (1991). Stability evaluation during staged construction. Journal of Geotechnical Engineering, 117(4), 540-616.

Bowles, J. E. (1997). Physical and geotechnical properties of soils. McGraw-Hill.

Cernica, J. N. (1995). Geotechnical engineering: Soil mechanics. Wiley.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. Wiley.

Márquez, J. A., & López, M. (2015). Geotecnia: fundamentos y aplicaciones. Madrid: Ediciones de la Universidad Politécnica de Madrid.

López, M. (2018). Ingeniería de Suelos: Teoría y Práctica. Barcelona: Ediciones UPC.

Norma ISO 22476-2(2005). Ensayo de penetración dinámica tipo Borros. AENOR.

UNE-EN ISO 17892-1 (2015). Determinación de la humedad. AENOR.

UNE-EN-103 1000(1995). Ensayos de laboratorio. AENOR.

UNE-103 503(1980). Determinación “in situ” de la densidad de un suelo por el método de la arena. AENOR.

UNE-EN ISO 17892-12(2018). Determinación de los límites de Atterberg Norma. AENOR.

UNE-ISO 17892-4(2016). Análisis granulométrico “PARTE 4”. AENOR.

UNE 103601(1996). Cálculo de hinchamiento libre de un suelo en edómetro. AENOR.

UNE 103600(1999). Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe. AENOR.