



Informe:

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELO ROJIZO DE LA BARDA NORTE DEL VALLE INFERIOR DEL RÍO CHUBUT. CIUDAD DE TRELEW

Tutor Académico: Ing Moreno Oscar

Tutor Externo: Ing. Jones Alejandro

DICIEMBRE
2024

Lugar de desarrollo: Laboratorio de investigaciones y Ensayos Viales - LABIEVI

Raigné Josué Gabriel

DNI: 39681880

Matricula: 34-33-6284

Email: jgrmmo96@gmail.com



Inicio: 1 de Agosto 2024

Fin: 05 de Diciembre 2024



ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE TABLAS	2
INDICE DE IMAGENES.....	3
RESUMEN DE LA PPS	6
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES REALIZADAS	8
ENSAYOS REALIZADOS.....	9
PESO ESPECÍFICO DE LA FASE SÓLIDA DEL SUELO GS	9
GRANULOMETRÍA	10
LÍMITES DE ATTERBERG.....	12
LÍMITE LÍQUIDO.....	12
LÍMITE PLÁSTICO	17
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	20
LÍMITE DE CONTRACCIÓN	20
CLASIFICACIÓN DEL SUELO.....	27
H.R.B.	27
S.U.C.S.	28
COMPACTACIÓN	31
T99.....	31
T180.....	38
VALOR SOPORTE E HINCHAMIENTO DE SUELOS.....	42
GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO	58
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD EN EL CAMPO	67
ENSAYO DE PENETRÓMETRO DINAMICO DE CONO – DCP.....	73
RESULTADOS ENSAYO DCP EN CAMPO.....	76
CORRELACIÓN DE DENSIDADES – VALOR SOPORTE – ÍNDICE DCP	82
CORRECCIÓN DE VALORES CRB PARA SUELO 139-24	86
CONCLUSIONES	90
VALORACIONES DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92
ANEXO: TABLA DE CLASIFICACIÓN SUCS.....	93



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados del ensayo de Granulometría para la muestra 139-24.....	12
Tabla 2: Resultados para el Ensayo de Límite Líquido de la muestra 139-24.	16
Tabla 3: Denominadores de la fórmula de corrección de Límite Líquido.	17
Tabla 4: Resultados para el Ensayo de Límite Plástico de la muestra 139-24.	20
Tabla 5: Resultados para el Ensayo de Límite de Contracción de la muestra 139-24.....	23
Tabla 6: Tabla resumen de la Clasificación de suelos por el sistema H.R.B. (Fuente: Normas de ensayos - Vialidad Nacional).	27
Tabla 7: Resultados Ensayo de Compactación T99 (Fuente: Elaboración propia).	37
Tabla 8: Resultados Ensayo de Compactación T180 (Fuente: Elaboración propia).	39
Tabla 9: Valores para curva de Saturación (Fuente: Elaboración propia).....	40
Tabla 10: Valores de penetración para registro de carga.	45
Tabla 11: Energía de compactación de probetas (Fuente: Elaboración propia).	46
Tabla 12: Densidades obtenidas para las probetas (Fuente: Elaboración Propia).	47
Tabla 13: Coeficientes para el cálculo de Valor Soporte (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).	47
Tabla 14: Resultados de Valor soporte para Probetas de suelo 139-24 no saturadas (Fuente: Elaboración propia).	48
Tabla 15: Resultados de Valor soporte para Probetas de suelo 139-24 saturadas (Fuente: Elaboración propia).	51
Tabla 16: Resultados de ensayo de hinchamiento de probetas de suelo 139-24 sumergidas (Fuente: Elaboración propia).....	54
Tabla 17: Datos obtenidos del ensayo de la muestra de suelo 139-24 para el hidrómetro H151 (Fuente: Elaboración propia).....	60
Tabla 18: Coeficientes de corrección por viscosidad (Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil. J. Bowles).	61
Tabla 19: Profundidad efectiva L para el hidrómetro H151 (Fuente: ASTM D422-63).	61
Tabla 20: Resultados de Diámetro y porcentaje pasante para muestra de suelo 139-24 con hidrómetro H151 (Fuente: Elaboración propia).....	62
Tabla 21: Datos obtenidos del ensayo de la muestra de suelo 139-24 para el hidrómetro H152 (Fuente: Elaboración propia).....	62
Tabla 22: Profundidad efectiva L para el hidrómetro H152 (Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil. J. Bowles).	63
Tabla 23: Resultados de Diámetro y porcentaje pasante para muestra de suelo 139-24 con hidrómetro H152 (Fuente: Elaboración propia).....	63
Tabla 24: Material pasante resultante de los ensayos y su promedio (Fuente: Elaboración Propia).	64
Tabla 25: Granulometría de partículas con tamaño mayor a 75 micrones (Fuente: Elaboración propia).	64
Tabla 26: Resultados de granulometría de las muestras de suelo 139-24 (Fuente: Elaboración propia).	65
Tabla 27: Fracción de suelo de partículas finas (Fuente: Elaboración propia).....	66
Tabla 28: Proporción de partículas sobre la totalidad de la muestra (Fuente: Elaboración propia).	66
Tabla 29: Resultados Ensayo DCP para el puesto 1A (Fuente: Elaboración propia).	76
Tabla 30: Resultados Ensayo DCP para el puesto 1B (Fuente: Elaboración propia).	77
Tabla 31: Resultados Ensayo DCP para el puesto 1C (Fuente: Elaboración propia).	78



Tabla 32: Resultados Ensayo DCP para el puesto 2A (Fuente: Elaboración propia).....	79
Tabla 33: Resultados Ensayo DCP para el puesto 2B (Fuente: Elaboración propia).....	80
Tabla 34: Resultados Ensayo DCP para el puesto 2C (Fuente: Elaboración propia).....	81
Tabla 35: Energía de compactación para ensayos CBR-DCP (Fuente: Elaboración propia).....	82
Tabla 36: Características de las probetas realizadas para ensayos CBR-DCP (Fuente: Elaboración propia).....	82
Tabla 37: Resultados de ensayo de Valor Soporte para análisis de ensayo DCP (Fuente: Elaboración propia).....	83
Tabla 38: Resistencias promedio de suelos 312-24 y 313-24 en campo (Fuente: Elaboración propia).....	84
Tabla 39: Valores CBR y densidades para los suelos ensayados (Fuente: Elaboración propia).....	84
Tabla 40: Resultados ensayo DCP en las probetas (Fuente: Elaboración propia).....	87
Tabla 41: Relación CBR obtenido en laboratorio e índice DCP obtenido de probetas (Fuente: Elaboración propia).....	87
Tabla 42: Relación de valores promedio CBR entre los obtenidos por norma y los obtenidos por la relación adoptada en laboratorio (Fuente: Elaboración propia).....	88
Tabla 43: Resumen características físicas (Fuente: Elaboración propia).....	90

INDICE DE IMAGENES

Imagen 1: Ubicación de la ciudad de Trelew, donde se obtuvieron las muestras de suelo (Fuente: Google Earth).....	6
Imagen 2: Puntos de Extracción de Muestras (Fuente: Elaboración Propia con Google Earth) ...	7
Imagen 3: Puntos de Extracción de Muestras (Fuente: Elaboración Propia con Google Earth) ...	7
Imagen 4: 500gr de suelo de muestra 139/24 (Fuente: Elaboración Propia).....	11
Imagen 5: Ilustración de cascador de Casagrande (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).....	13
Imagen 6: Ilustración Acanalador (Fuente: Normas de Ensayo - Vialidad Nacional).....	13
Imagen 7: Cuchara de Casagrande utilizada en los ensayos (Fuente: Elaboración Propia).....	13
Imagen 8: Colocación de muestra en la Cuchara de Casagrande (Fuente: Elaboración Propia).....	15
Imagen 9: Colocación de la pasta en la capsula (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).....	15
Imagen 10: Conformación de cilindros de material 139-24.....	19
Imagen 11: Pesafiltros con muestras para límite plástico (izquierda) y líquido (derecha).....	19
Imagen 12: Pesaje de pastillas en estado húmedo (foto correspondiente a otro suelo analizado).....	22
Imagen 13: Pastillas de suelo 139-24 secadas en el horno.....	22
Imagen 14: Procedimiento de hundimiento de pastillas en mercurio.....	23
Imagen 15: Pesaje de mercurio desplazado por la pastilla de suelo.....	23
Imagen 16: Grafico de evolución del volumen ante la evolución del contenido de humedad en el suelo.....	26
Imagen 17: Carta de plasticidad (Fuente: SUCS).....	28
Imagen 18: Detalle molde para ensayo de compactación (Fuente: Normas de Ensayo - Vialidad Nacional).....	31
Imagen 19: Detalle Pisón utilizado para compactar (Fuente: Normas de ensayos - Vialidad Nacional).....	32
Imagen 20: Elementos utilizados para el ensayo.....	32
Imagen 21: Compactación de probetas con pisón.....	34
Imagen 22: Enrazado de la probeta.....	34



Imagen 23: Prensa de extracción de probetas.....	35
Imagen 24: Probeta extraída del molde.....	35
Imagen 25: Muestras de suelo 139-24 secadas hasta peso constante.....	36
Imagen 26: Grafico de resultados ensayo de compactación T99 (Fuente: Elaboración propia). 37	
Imagen 27: Grafico de resultados ensayo de compactación T180 (Fuente: Elaboración propia).	39
Imagen 28: Curvas de compactación resultado de los ensayos T99 y T180 (Fuente: Elaboración propia).	41
Imagen 29: Aros dinamométricos utilizados en el laboratorio.	43
Imagen 30: Moldes para valor soporte utilizados en el laboratorio.....	43
Imagen 31: Moldes preparados para ser sumergidos en agua.....	45
Imagen 32: Prensa preparada para ensayar penetración sobre una probeta.	46
Imagen 33: Grafico de relación Presión vs Penetración para las probetas de suelo 139-24 no saturadas (Fuente: Elaboración propia).	49
Imagen 34: Grafico de evolución de valor soporte con el aumento de densidad seca de las probetas no saturadas (Fuente elaboración propia).	50
Imagen 35: Grafico de relación Presión vs Penetración para las probetas de suelo 139-24 saturadas (Fuente: Elaboración propia).	52
Imagen 36: Gráfico de evolución de valor soporte con el aumento de densidad seca de las probetas saturadas (Fuente elaboración propia).....	53
Imagen 37: Comparación de VS obtenido para probetas saturadas y no saturadas según la densidad de las mismas (Fuente: Elaboración propia).	53
Imagen 38: Gráfico de hinchamiento de las probetas sumergidas de suelo 139-24 en los primeros 330 minutos (Fuente Elaboración propia).	55
Imagen 39: Gráfico de hinchamiento de las probetas sumergidas de suelo 139-24 (Fuente Elaboración propia).	56
Imagen 40: Hidrómetro tipo (Fuente: Internet).....	58
Imagen 41: Hexametáfosfato utilizado en el laboratorio.	59
Imagen 42: Izq. Batidora de laboratorio (Fuente: Internet) Der. Material de suelo batido en el laboratorio.....	59
Imagen 43: Probeta con muestra de suelo y probetas auxiliares para contención de hidrómetros y toma de temperatura.	59
Imagen 44: Curva granulométrica para partículas menores a 75 micrones (Fuente: Elaboración propia).	64
Imagen 45: Curva Granulométrica del suelo 139-24 (Fuente: Elaboración Propia).	65
Imagen 46: Corte y vista del cono utilizado para la determinación de densidad de material en campo (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).	67
Imagen 47: Corte y planta de la bandeja utilizada para la determinación de densidad de material en campo (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).....	68
Imagen 48: Colocación de la bandeja de hierro en el terreno.....	68
Imagen 49: Excavación del hoyo y retiro de material.	69
Imagen 50: Izq. Colocación del cono en la bandeja Der. Colocación de la arena en el cono.	69
Imagen 51: Distancia entre puntos de extracción de muestras (Fuente: Google Earth).....	70
Imagen 52: Distancia entre muestras 312-24 y 313-24 (Fuente: Google Earth).....	70
Imagen 53: Muestras de suelo extraídas para determinación de densidad en campo (Der. Suelo 313-24 Izq. Suelo 312-24).....	71
Imagen 54: Esquema del DCP (Fuente: Norma ASTM D6951-03).....	73



Imagen 55: Operación del DCP Izq. Elevación de la masa Der. Caída de la masa (Fuente: Elaboración propia).....	74
Imagen 56: Relación CBR e índice DCP (Fuente: Elaboración propia).....	75
Imagen 57: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 1A (Fuente: Elaboración Propia).....	76
Imagen 58: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 1A (Fuente: Elaboración propia).....	76
Imagen 59: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 1B (Fuente: Elaboración Propia).....	77
Imagen 60: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 1B (Fuente: Elaboración propia).....	77
Imagen 61: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 1C (Fuente: Elaboración Propia).....	78
Imagen 62: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 1C (Fuente: Elaboración propia).....	78
Imagen 63: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 2A (Fuente: Elaboración Propia).....	79
Imagen 64: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 2A (Fuente: Elaboración propia).....	79
Imagen 65: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 2B (Fuente: Elaboración Propia).....	80
Imagen 66: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 2B (Fuente: Elaboración propia).....	80
Imagen 67: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 2C (Fuente: Elaboración Propia).....	81
Imagen 68: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 2C (Fuente: Elaboración propia).....	81
Imagen 69: Gráfico de relación de densidades del suelo y valores obtenidos de CBR (Fuente: Elaboración propia).....	84
Imagen 70: Relación Densidad - CBR sin los valores del molde 2.....	85
Imagen 71: Relación Densidad - CBR sin los valores del molde 3.....	85
Imagen 72: Relación Densidades - CBR para suelo en estado natural (Fuente: Elaboración propia).....	86
Imagen 73: Relación DCP - CRB para el suelo 139-24 (Fuente: Elaboración propia).....	87
Imagen 74: Relación Densidad - CBR obtenido en laboratorio (Fuente: Elaboración propia)....	88
Imagen 75: Comparación de expresión de norma y expresión experimental para la relación $CBR=f(DCP)$ (Fuente Elaboración propia).....	89

RESUMEN DE LA PPS

El presente informe detalla los ensayos realizados durante las prácticas profesionales supervisadas con el objetivo de caracterizar la muestra de suelo 139-24 obtenida al norte de la ciudad de Trelew en la estación de gas perteneciente a Camuzzi, que se encuentra junto a la planta potabilizadora de agua de la ciudad de Puerto Madryn como se puede observar en la Imagen 3: Puntos de Extracción de Muestras (Fuente: Elaboración Propia con Google Earth) junto con dos muestras más del mismo material obtenidas en un punto entre la planta de gas y el Aeropuerto Internacional Almirante Marcos A. Zar (suelos 312-24 y 313-24). Estas muestras corresponden al suelo rojizo encontrado sobre la barda norte en las cercanías del Valle Inferior del Río Chubut en la ciudad de Trelew.

Los ensayos realizados permiten conocer la conformación del suelo según el tamaño de sus partículas, sus propiedades físicas y el comportamiento de este frente a esfuerzos externos y ante la presencia de agua.

También se hará uso del ensayo DCP para obtención de valores CRB para el suelo en estado natural en los puntos de extracción de las muestras de suelo 312-24 y 313-24.

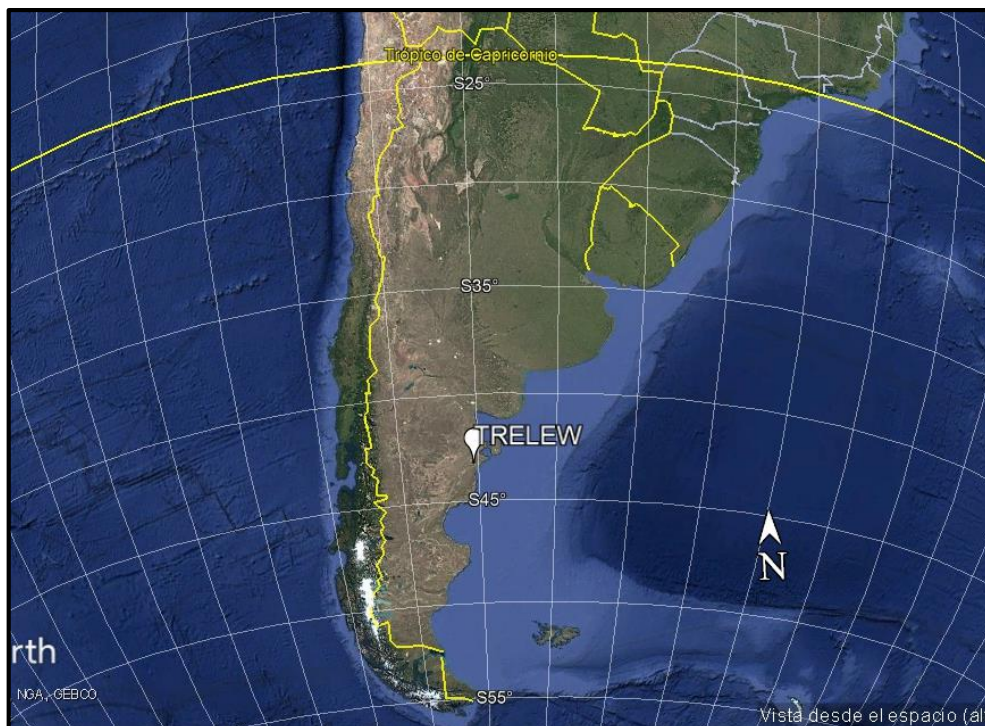


Imagen 1: Ubicación de la ciudad de Trelew, donde se obtuvieron las muestras de suelo (Fuente: Google Earth).



Imagen 2: Puntos de Extracción de Muestras (Fuente: Elaboración Propia con Google Earth)



Imagen 3: Puntos de Extracción de Muestras (Fuente: Elaboración Propia con Google Earth)



CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES REALIZADAS

Actividad Realizada	Horas
Determinación de la Gravedad Específica G_s del suelo	6
Análisis de Granulometría del suelo	15
Determinación del Límite Líquido y Límite Plástico	30
Determinación del Límite de Contracción	12
Ensayo de Compactación T99	25
Ensayo de Compactación T180	25
Ensayo de determinación de Valor Soporte – CRB e Hinchamiento	40
Granulometría por Hidrómetro	15
Determinación de la densidad de suelo en campo	12
Determinación de resistencia de suelo mediante en ensayo DCP	60
Horas Totales	240



ENSAYOS REALIZADOS

PESO ESPECÍFICO DE LA FASE SÓLIDA DEL SUELO G_s

Para determinar el peso específico de la fase sólida del material del suelo 139-24, se tiene la siguiente expresión:

$$G_s = \frac{P_s}{V_s}$$

Donde:

P_s : Peso de la fase sólida del suelo.

V_s : Volumen de la fase sólida.

La determinación de esto se hace por el siguiente método.

Elementos a utilizar:

- Mortero de porcelana y pilón revestido con goma.
- Tamiz IRAM 425 micrómetros (N°40).
- Matraz volumétrico aforado de 50ml.
- Olla de cocina.
- Hornalla.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 1 centigramo.

Procedimiento:

- Se pesa el matraz aforado a utilizar.
- Se agrega agua hasta la marca del matraz aforado y luego se procede a pesarlo.
- Se quita parte del agua colocada por debajo del cuello del matraz aforado y se pesa el mismo en esta condición.
- Se agrega una muestra de suelo al matraz aforado junto al agua previamente colocada y se pesa el matraz en esta condición.
- Se procede a colocar el matraz en una olla con agua al mismo nivel que el que tiene el matraz y luego se lleva la olla a hornalla para hervir el agua de la misma.
- Se retira el matraz y se mueve de forma tal que la muestra en su interior libere las burbujas de aire atrapadas entre las partículas de suelo. Luego de esto se vuelve a colocar el matraz en la olla por un nuevo período de tiempo (10 a 15 minutos) y se repite el procedimiento hasta que no se observe que la muestra libera burbujas de aire.
- Se deja enfriar el matraz con la muestra.
- Se vuelve a llenar el matraz con agua hasta la marca del mismo.



Resultados:

Con este proceso se obtienen los siguientes pesos.

P_1 : Peso del matraz con agua hasta un volumen determinado.

P_2 : Peso del matraz con un volumen menor de agua.

P_3 : Peso 2 más la muestra de suelo.

P_4 : Peso del matraz con agua y muestra de suelo luego de extraer el aire atrapado en la misma.

Con esto se puede calcular el G_s de la siguiente manera:

$$G_s = \frac{P_s}{V_s} = \frac{P_3 - P_2}{\{P_1 - [P_4 - (P_3 - P_2)]\} / \gamma_{H_2O}}$$

Para el suelo 139-24 se preparan dos muestras y se tienen los siguientes resultados de los pesos de los matraces.

Muestra 1:

P_1 : 363,2 gr

P_2 : 235,0 gr

P_3 : 322,1 gr

P_4 : 418,3 gr

$$G_{SM1} = \frac{P_s}{V_s} = \frac{322,1 \text{ gr} - 235,0 \text{ gr}}{\{363,2 \text{ gr} - [418,3 \text{ gr} - (322,1 \text{ gr} - 235,0 \text{ gr})]\}} = 2,7219$$

1 gr/cm^3

Muestra 2:

P_1 : 342,7 gr

P_2 : 191,9 gr

P_3 : 278,8 gr

P_4 : 397,6 gr

$$G_{SM2} = \frac{P_s}{V_s} = \frac{278,8 \text{ gr} - 191,9 \text{ gr}}{\{342,7 \text{ gr} - [397,6 \text{ gr} - (278,8 \text{ gr} - 191,9 \text{ gr})]\}} = 2,716$$

1 gr/cm^3

Se obtiene el promedio de los valores:

$$G_s = \frac{2,722 + 2,716}{2} = 2,719 \left\{ \begin{array}{l} +1\% = 2,746 \text{ Verifica Muestra 1} \\ -1\% = 2,691 \text{ Verifica Muestra 2} \end{array} \right.$$

GRANULOMETRÍA

El siguiente procedimiento se encuentra detallado en la Norma de Vialidad Nacional VN-E1-65.

- Se seca una cantidad determinada de al menos 500gr de suelo en la estufa a 105°C durante 24hs de manera que se elimine toda la humedad contenida en este.



Imagen 4: 500gr de suelo de muestra 139/24 (Fuente: Elaboración Propia).

- Una vez seco el material se toma dos muestras separadas de 100gr de suelo seco pesado en balanza de 1kg.
- Se procede a lavarlas utilizando el tamiz N°200 de manera de eliminar las partículas pasantes de este tamaño.
- Una vez que ya no pasa más material a través del tamiz N°200, se seca nuevamente las muestras en el horno.
- Luego de esto se procede a pasar cada muestra por los tamices correspondientes. Considerando que el suelo analizado es fino, los tamices a utilizar serán los tamices N°10 (IRAM 2,0mm), N°40 (IRAM 425 micrómetros), N°100 (IRAM 149 micrómetros) y N°200 (IRAM 75 micrómetros).
- Se pesa el material retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje pasante de cada medida de tamiz. Estos parámetros se calculan de la siguiente manera:

$$Pasante [\%] = \frac{P_{Pasante}[gr]}{P_{total}[gr]} * 100\%$$

$$Retenido [\%] = 100\% - Pasante [\%]$$



Muestra 1	Peso (gr)	100			Muestra 2	Peso (gr)	100		
Tamiz	Retiene	Pasa	%P	%R	Tamiz	Retiene	Pasa	%P	%R
10	1,3	98,7	99	1	10	1,2	98,8	99	1
40	5,4	93,3	93	7	40	5,3	93,5	94	7
100	28,7	64,6	65	35	100	29,6	63,9	64	36
200	16,9	47,7	47,7	52,3	200	15,9	48	48,0	52

Tabla 1: Resultados del ensayo de Granulometría para la muestra 139-24

LÍMITES DE ATTERBERG

Los límites de Atterberg son humedades que separan tres estados del suelo que separan los comportamientos del material, estos límites son El Límite Plástico (LP), el Límite Líquido (LL) y el Límite de Contracción (LC). Para la obtención de estos límites a través de los distintos ensayos se necesita la fracción de suelo que pasa el tamiz N°40.

LÍMITE LÍQUIDO

El siguiente procedimiento se encuentra detallado en la Norma de Vialidad Nacional VN-E2-65.

Este límite indica el contenido de humedad cuando un suelo se encuentra entre el estado plástico y el estado líquido. Se define como el contenido de humedad necesario para que dos mitades de una pasta de suelo de 1cm de espesor fluya de tal manera que se unan en una longitud de 12mm en el fondo de la muesca que separa las mitades de pasta al golpear 25 veces la cápsula desde una altura de 1cm a una velocidad de 2 golpes por segundo.

Elementos a utilizar:

- Mortero de porcelana y pilón revestido con goma.
- Tamiz IRAM 425 micrómetros (N°40).
- Capsula de hierro enlozado de 10 a 12cm de diámetro.
- Espátula de acero flexible con mango de madera.
- Aparato para determinación semimecánica de límite líquido de las dimensiones indicadas en la Imagen 5: Ilustración de cascador de Casagrande (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional). denominado como cascador de Casagrande.
- Acanalador de bronce con las dimensiones indicadas en la Imagen 6: Ilustración Acanalador (Fuente: Normas de Ensayo - Vialidad Nacional)..
- Pesafiltros de aluminio de 40mm de diámetro y 30mm de altura.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 1 centigramo.
- Estufa para secado de muestras con temperatura regulable de entre 105°C y 110°C.

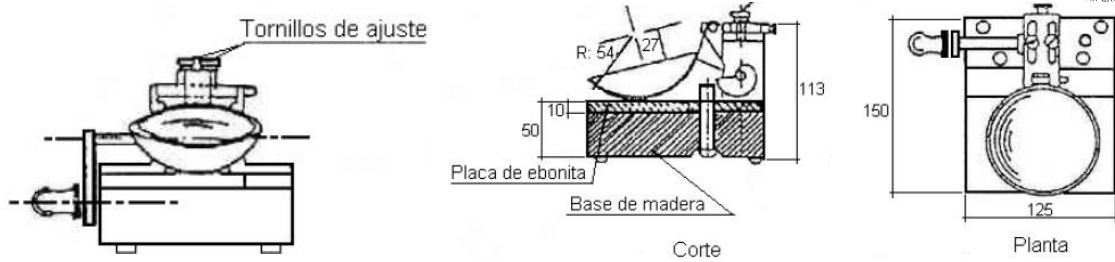


Imagen 5: Ilustración de cascador de Casagrande (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).

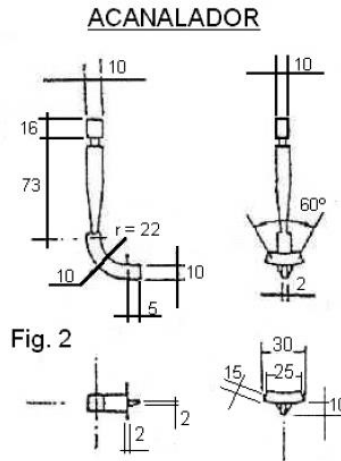


Imagen 6: Ilustración Acanalador (Fuente: Normas de Ensayo - Vialidad Nacional).



Imagen 7: Cuchara de Casagrande utilizada en los ensayos (Fuente: Elaboración Propia).

Preparación de la muestra:

Se toma una muestra de 400gr por cuarteo de suelo secado al aire y se lo hace pasar por el tamiz IRAM 425 micrómetros (N°40). Al suelo retenido por el tamiz se lo trata en el mortero con el pilón revestido en goma, de esta manera se reduce el tamaño de los grumos hasta hacer pasar la totalidad de la muestra o de manera que el material retenido este constituido por partículas individuales de mayor tamaño que la abertura del



tamiz. Una vez tamizado el material, se mezcla cuidadosamente de manera que se obtenga un material homogéneo.

Procedimiento:

- 1- Se toma 50 o 60gr de material tamizado y se coloca en una capsula de hierro enlozado.
- 2- Se humedece la muestra con agua potable dejándose reposar al menos 24 horas debido a que el material a ensayar es muy fino y tiene una alta probabilidad de ser altamente plástico.
- 3- Previo al ensayo, se agrega agua en pequeñas cantidades mezclando cuidadosamente con la espátula procurando obtener una humedad distribuida homogéneamente en todo el material deshaciendo los grumos que se formen.
- 4- Una vez que la pasta adquiere una consistencia tal que al ser dividida en dos porciones y golpear la capsula contra la palma de la mano, las partes comiencen a fluir.
- 5- Se coloca una porción de la pasta en la capsula de bronce de la cuchara de Casagrande, amasándola bien y colocándola de la forma que se indica en la Imagen 9: Colocación de la pasta en la capsula (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).de manera que el espesor en el centro de la cuchara sea de aproximadamente 1cm y generando una muesca en el fondo de la cuchara de un ancho de 2mm.



Imagen 8: Colocación de muestra en la Cuchara de Casagrande (Fuente: Elaboración Propia).

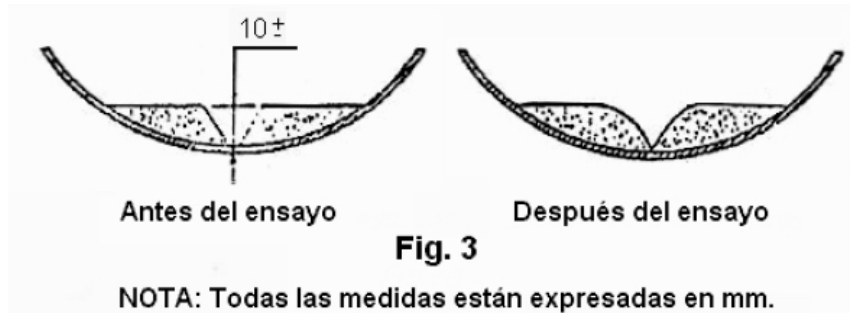


Imagen 9: Colocación de la pasta en la capsula (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).

- 6- Se acciona la manivela del cascador a razón de dos vueltas por segundo contabilizando el número de golpes necesarios para que por fluencia las dos partes de la pasta se cierren en los bordes inferiores de la muesca en una longitud de aproximadamente 12mm.
- 7- Se debe procurar que la cantidad de golpes contabilizados sea cercana a los 25 golpes, si fueron necesarios más de 25 golpes entonces el material no tiene la humedad requerida y se debe agregar a la pasta, volver a mezclar e iniciar nuevamente el procedimiento en la cuchara. Si por el contrario las partes se unen con una cantidad mucho menor a 25 golpes, se tiene que la pasta tiene demasiada humedad, por lo que se debe comenzar todo el procedimiento nuevamente. Para evitar esto último es preferible separar la muestra de la capsula en dos partes antes de agregar las ultimas cantidades de agua, de esta manera si ocurre que la prueba falla por exceso de humedad, se tiene una porción de suelo con el cual trabajar rápidamente.
- 8- Una vez finalizado el procedimiento de contabilización de golpes se extrae una muestra de la cuchara de aproximadamente 10gr, la cual se colocará en un pesafiltro previamente tarado y se tomará el peso



exacto de la muestra. Se anotará también el peso del pesafiltro y los golpes requeridos para el cierre de la muesca.

9- La muestra es llevada al horno de secado entre 105°C y 110°C hasta peso constante.

Resultados:

Muestra	Pesafiltros		PF+M.Humeda		PF. Cilindros	Factor Corr	PF+M.Seca
	Pesafiltro	Peso (gr)	Peso (gr)	Golpes	Peso (gr)	por golpes	Peso (gr)
1	8	35,73	69,17	25	-	1	61,46
2	10	32,65	58,53	25	-	1	52,57

Tabla 2: Resultados para el Ensayo de Límite Líquido de la muestra 139-24.

Se calcula la humedad para la muestra 1, obteniendo la humedad de la misma.

$$H = \left(\frac{P_h - P_s}{P_s - P_{pf}} \right) * 100\%$$

Donde:

P_h : Peso de la muestra más el pesafiltro en estado húmedo.

P_s : Peso de la muestra más el pesafiltro en estado seco.

P_{pf} : Peso del pesafiltro.

Para la muestra 1 se tiene:

$$H_{M1} = \left(\frac{69,17gr - 61,46gr}{61,46gr - 35,75gr} \right) * 100\% = 30\%$$

Se realiza también para la muestra 2:

$$H_{M2} = \left(\frac{58,53gr - 52,57gr}{52,57gr - 32,65gr} \right) * 100\% = 29,9\%$$

Para la obtención del límite líquido se hace una corrección según la cantidad de golpes obtenida. Para esto se aplica la siguiente fórmula:

$$LL = \frac{H}{1,419 - 0,3 * \log N}$$

Siendo N el número de golpes.

Para mayor comodidad la norma de ensayos proporciona una tabla con los valores asociados al denominador de la formula según la cantidad de golpes.



N	$1,419 - 0,3 \log. N$
20	1,029
21	1,023
22	1,017
23	1,011
24	1,005
25	1,000
26	0,995
27	0,990
28	0,985
29	0,980
30	0,976

Tabla 3: Denominadores de la fórmula de corrección de Límite Líquido.

Puede observarse que para 25 golpes, lo cual es el número obtenido para este ensayo, el denominador de la fórmula es igual a la unidad, por lo que el Límite Líquido será igual a la humedad calculada previamente. Además considerando la similitud de los resultados obtenidos se puede adoptar para la muestra 139-24 un Límite Líquido igual a 30%.

$$LL_{139-24} = 30\%$$

LÍMITE PLÁSTICO

Siguiendo con los procedimientos detallados en las normas de ensayos de Vialidad Nacional, se procede con la obtención del Límite Plástico, este es el contenido de humedad más bajo en el cual el suelo, al ser moldeado en barritas cilíndricas de menor diámetro cada vez, comienzan a agrietarse al alcanzar los 3mm de diámetro. Corresponde al contenido de humedad existente en un suelo expresado en porcentaje, que es el límite entre el estado plástico y el estado sólido del mismo.

Elementos a utilizar:

- Mortero de porcelana y pilón revestido con goma.
- Tamiz IRAM 425 micrómetros (N°40).
- Capsula de hierro enlozado de 10 a 12cm de diámetro.
- Espátula de acero flexible con mango de madera.
- Vidrio plano o placa de Policarbonato de 30cm x 30cm.
- Trozos de alambre galvanizado de 3mm de diámetro, para comparación.
- Pesafiltros de aluminio de 40mm de diámetro y 30mm de altura.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 1 centigramo.
- Estufa para secado de muestras con temperatura regulable de entre 105°C y 110°C.

Preparación de la muestra:



Se toma una muestra de 400gr por cuarteo de suelo secado al aire y se lo hace pasar por el tamiz IRAM 425 micrómetros (N°40). Al suelo retenido por el tamiz se lo trata en el mortero con el pilón revestido en goma, de esta manera se reduce el tamaño de los grumos hasta hacer pasar la totalidad de la muestra o de manera que el material retenido este constituido por partículas individuales de mayor tamaño que la abertura del tamiz. Una vez tamizado el material, se mezcla cuidadosamente de manera que se obtenga un material homogéneo.

Procedimiento:

- 1- Se toma 50 o 60gr de material tamizado y se coloca en una capsula de hierro enlozado.
- 2- Se humedece la muestra con agua potable dejándose reposar al menos 24 horas debido a que el material a ensayar es muy fino y tiene una alta probabilidad de ser altamente plástico.
- 3- Previo al ensayo, se agrega agua en pequeñas cantidades mezclando cuidadosamente con la espátula procurando obtener una humedad distribuida homogéneamente en todo el material deshaciendo los grumos que se formen.
- 4- Se mezcla hasta que se obtenga una pasta de la cual se puedan moldear pequeñas esferas sin adherirse a las manos del operador.
- 5- Se toma una porción de la muestra y se la hace rodar con la palma de la mano sobre el vidrio dándole forma de cilindros.
- 6- Los cilindros se hacen rodar a una velocidad de 80 o 90 ciclos por minuto, siendo el ciclo un movimiento hacia adelante y hacia atrás del cilindro.
- 7- Si se obtienen cilindros de un diámetro menor a 3mm pero que no presentan fracturas o desmenuzados, estos se reúnen y se amasan nuevamente hasta obtener el resultado deseado. En el caso que se agrieten cuando los cilindros tienen un diámetro mayor a 3mm, se reúnen los cilindros y se los vuelve a amasar integrando agua para aumentar su contenido de humedad.
- 8- El ensayo termina cuando los cilindros se comienzan a agrietar al tener un diámetro aproximado a los 3mm, medida que se puede observar comparando con los alambres que tienen este diámetro.



Imagen 10: Conformación de cilindros de material 139-24.

- 9- Se colocan las barras cilíndricas en un pesafiltro previamente tarado, se pesan y se envían al horno para su secado entre 105°C y 110°C hasta obtener un peso constante. Se debe anotar también el peso del pesafiltro.



Imagen 11: Pesafiltros con muestras para límite plástico (izquierda) y líquido (derecha).

Resultados:

Muestra	Pesafiltros		PF+M.Humeda	PF+M.Seca
	Pesafiltro	Peso (gr)	Peso (gr)	Peso (gr)
1	6	32,72	47,37	44,97
2	7	32,16	47,18	44,74



Tabla 4: Resultados para el Ensayo de Límite Plástico de la muestra 139-24.

El límite plástico se obtiene calculando la humedad de las muestras.

$$LP = \left(\frac{P_h - P_s}{P_s - P_{pf}} \right) * 100\%$$

Donde:

P_h : Peso de la muestra más el pesafiltro en estado húmedo.

P_s : Peso de la muestra más el pesafiltro en estado seco.

P_{pf} : Peso del pesafiltro.

Se calcula entonces para las muestras:

$$LP_{M1} = \left(\frac{47,37gr - 44,97gr}{44,97gr - 32,72gr} \right) * 100\% = 19,6\%$$

$$LP_{M2} = \left(\frac{47,18gr - 44,74gr}{44,74gr - 32,16gr} \right) * 100\% = 19,4\%$$

Se adopta para la muestra de suelo 139-24 un Límite Plástico de 19,5%.

$$LP_{139-24} = 19,5\%$$

ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Ó índice plástico, es la diferencia numérica entre los valores del límite líquido y el límite plástico de un mismo suelo.

$$I_p = LL - LP$$

Para este suelo se tiene:

$$I_{p139-24} = 30 - 19,5 = 10,5$$

LÍMITE DE CONTRACCIÓN

Este límite se define como el contenido de humedad de un suelo, en el que aún continuando con la pérdida de agua, no cambiará de volumen. La determinación de este parámetro no se encuentra contemplada en las Normas de Ensayos de Vialidad Nacional, sino que se hace según la Norma IRAM 10504/1959 especificado así en el Reglamento Argentino de Estudios Geotécnicos del CIRSOC e INTI en la República Argentina.

Elementos a utilizar:

- Mortero de porcelana y pilón revestido con goma.
- Tamiz IRAM 425 micrómetros (N°40).
- Capsula de hierro enlozado de 10 a 12cm de diámetro.
- Espátula de acero flexible con mango de madera.
- Mercurio.
- Capsulas de acero para pastillas de suelo.
- Molde acrílico para contención de mercurio.
- Vaselina



- Bandeja metálica para contención de mercurio excedente.
- Herramienta para sumersión de pastillas de suelo en el mercurio.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 1 centigramo.
- Estufa para secado de muestras con temperatura regulable de entre 105°C y 110°C.

Preparación de la muestra:

Se toma una muestra de 400gr por cuarteo de suelo secado al aire y se lo hace pasar por el tamiz IRAM 425 micrómetros (N°40). Al suelo retenido por el tamiz se lo trata en el mortero con el pilón revestido en goma, de esta manera se reduce el tamaño de los grumos hasta hacer pasar la totalidad de la muestra o de manera que el material retenido este constituido por partículas individuales de mayor tamaño que la abertura del tamiz. Una vez tamizado el material, se mezcla cuidadosamente de manera que se obtenga un material homogéneo.

Procedimiento:

- 1- Se procede con la obtención del peso de las capsulas en la balanza y del molde acrílico.
- 2- Se llena la capsula de mercurio eliminando el sobrante, se vierte el mercurio dentro del molde acrílico y se pesa el mismo.
- 3- Se toma 50 o 60gr de material tamizado y se coloca en una capsula de hierro enlozado.
- 4- Se humedece la muestra por encima del límite líquido, obteniendo de esta manera un material que fluya con facilidad.
- 5- Se coloca vaselina en la capsula para la pastilla de suelo.
- 6- Se coloca el material dentro de la capsula para pastillas de suelo, se enraza la misma y se golpea dejando caer la capsula desde una pequeña altura sobre la mesa donde se está haciendo el procedimiento, repitiendo esto hasta que no se perciba el escape de ninguna burbuja de aire que se encuentre atrapada en el material.

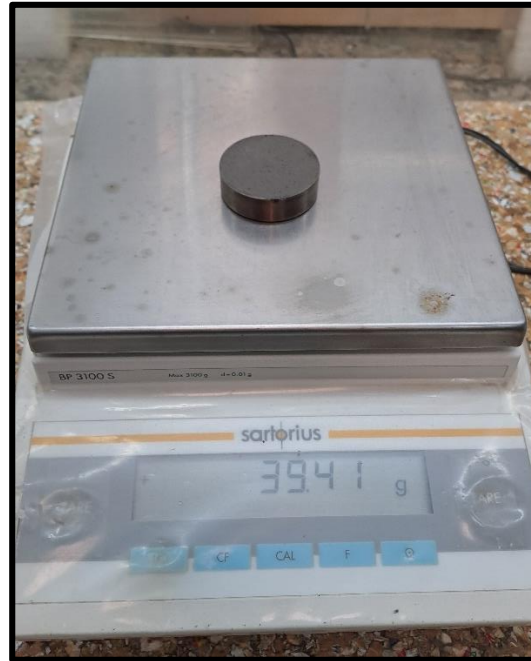


Imagen 12: Pesaje de pastillas en estado húmedo (foto correspondiente a otro suelo analizado).

- 7- Se pesa la capsula con el material colocado y se lleva a secar en el horno a 105°C-110°C hasta obtener un peso constante.



Imagen 13: Pastillas de suelo 139-24 secadas en el horno.

- 8- Se pesa nuevamente la capsula con la pastilla y se extrae esta última con cuidado de que no se rompa.
- 9- Se llena el molde acrílico con mercurio hasta enrasarlo en una bandeja y se elimina el excedente.
- 10- Se tara la bandeja donde luego se colocara el molde acrílico.
- 11- Se toma la pastilla de suelo, se coloca sobre el mercurio y haciendo uso de una herramienta especial se procede a hundir la pastilla en el mercurio de forma tal que todo el excedente generado por este procedimiento caiga en la bandeja previamente tarada, con esto se obtiene el peso de mercurio correspondiente al volumen de la pastilla hundida.

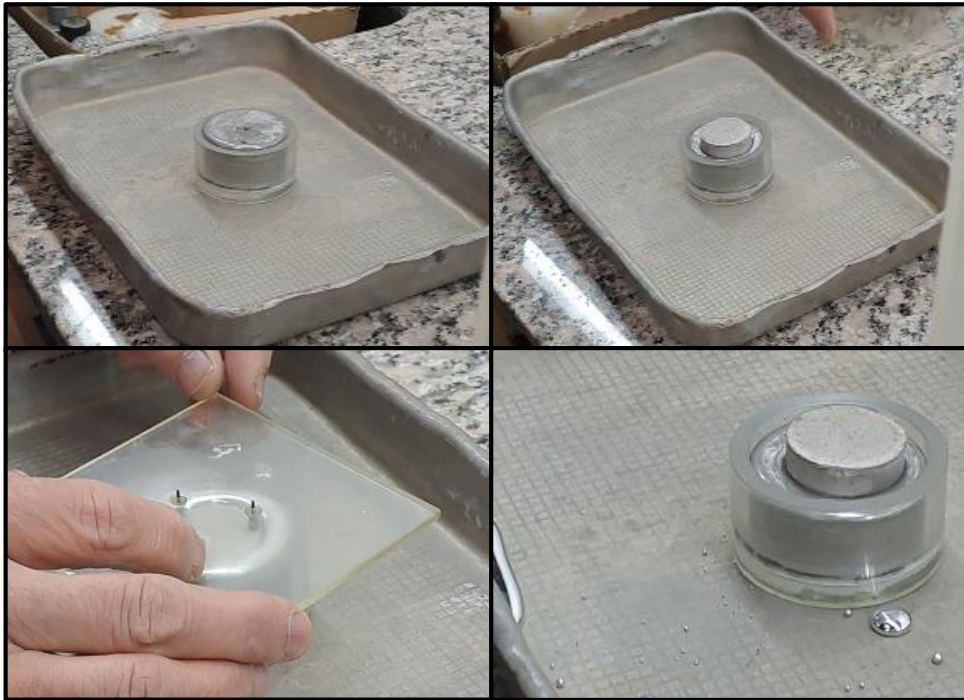


Imagen 14: Procedimiento de hundimiento de pastillas en mercurio.

12- Se pesa la bandeja con el mercurio desplazado.



Imagen 15: Pesaje de mercurio desplazado por la pastilla de suelo.

Resultados:

Una vez que se obtienen los datos se procede con su análisis. Para la muestra 139-24 se realizaron dos pastillas obteniendo los siguientes resultados:

Capsula	P Cap (C)	Hg int C+M.acr	P Molde (M)	C+Psh	C+Pss	Hg despl
	gr	gr	gr	gr	gr	gr
M109	15,01	269,88	47,89	44,71	36,29	173,4
M115	14,28	261,75	47,89	42,66	34,69	164,64

Tabla 5: Resultados para el Ensayo de Límite de Contracción de la muestra 139-24.



Se procederá con los siguientes cálculos:

$$P_{Hg.en.M.acr} = P_{Cap+Hg} - P_{M.acr}$$

$$V_{sh} = \frac{P_{Hg.en.Cap}}{\gamma_{Hg}}$$

$$V_{ss} = \frac{P_{Hg.desp}}{\gamma_{Hg}}$$

$$P_{sh} = P_{sh+Cap} - P_{Cap}$$

$$P_{ss} = P_{ss+Cap} - P_{Cap}$$

Donde:

P_{Cap} : Es el peso de la capsula.

P_{sh} : Es el peso del suelo húmedo.

P_{ss} : Es el peso del suelo seco.

$P_{M.acr}$: Peso del molde acrílico.

$P_{Hg.en.M.acr}$: Es el peso del mercurio contenido en la capsula.

P_{Cap+Hg} : Es el peso del mercurio contenido en la capsula más el peso de la capsula.

P_{sh+Cap} : Es el peso del suelo húmedo más la capsula.

$P_{shs+Cap}$: Es el peso del suelo seco más la capsula.

$P_{Hg.desp}$: Es el peso del mercurio desplazado al hundir la pastilla de suelo en este.

V_{sh} : Es el volumen de suelo húmedo.

V_{ss} : Es el volumen de suelo seco.

γ_{Hg} : Es la densidad del mercurio la cual es igual a $13,6 \text{ gr/cm}^3$.

Con esto se obtiene la diferencia de volumen, lo cual también se traduce en una pérdida de volumen de agua y su masa, para lo cual se considera también la densidad del agua igual a $\gamma_{H_2O} = 1 \text{ gr/cm}^3$.

$$\Delta V = V_{sh} - V_{ss}$$

$$P_{H_2O.perdido} = \Delta V * \gamma_{H_2O}$$

Con esto se puede obtener el límite de contracción al restar a la humedad del suelo al moldear la pastilla, la humedad perdida hasta obtener un volumen constante.

$$LC = \frac{P_{sh} - P_{ss} - P_{H_2O.perdido}}{P_{ss}} * 100\%$$

Para la muestra de la Cápsula M109 se tiene:

$$P_{Hg.en.Cap} = 269,88 - 47,89 \text{ gr} = 221,99 \text{ gr}$$

$$V_{sh} = \frac{221,99 \text{ gr}}{13,6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 16,32 \text{ cm}^3$$

$$V_{ss} = \frac{173,40 \text{ gr}}{13,6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 12,75 \text{ cm}^3$$



$$\begin{aligned}P_{sh} &= 44,71 \text{ gr} - 15,01 \text{ gr} = 29,70 \text{ gr} \\P_{ss} &= 36,29 \text{ gr} - 15,01 \text{ gr} = 21,28 \text{ gr} \\H_{inicial} &= \frac{29,70 \text{ gr} - 21,28 \text{ gr}}{21,28 \text{ gr}} * 100\% = 39,6\% \\ \Delta V &= 16,32 \text{ cm}^3 - 12,75 \text{ cm}^3 = 3,57 \text{ cm}^3 \\P_{H_2O.perdido} &= 3,57 \text{ cm}^3 * 1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 3,57 \text{ gr} \\LC &= \frac{29,70 \text{ gr} - 21,28 \text{ gr} - 3,57 \text{ gr}}{21,28 \text{ gr}} * 100\% = 22,8\%\end{aligned}$$

Y para la muestra de la Cápsula M115 se tiene:

$$\begin{aligned}P_{Hg.en.Cap} &= 261,75 - 47,89 \text{ gr} = 213,86 \text{ gr} \\V_{sh} &= \frac{213,86 \text{ gr}}{13,6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 15,73 \text{ cm}^3 \\V_{ss} &= \frac{164,64 \text{ gr}}{13,6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 12,11 \text{ cm}^3 \\P_{sh} &= 42,66 \text{ gr} - 14,28 \text{ gr} = 28,38 \text{ gr} \\P_{ss} &= 34,69 \text{ gr} - 14,28 \text{ gr} = 20,41 \text{ gr} \\H_{inicial} &= \frac{28,38 \text{ gr} - 20,41 \text{ gr}}{20,41 \text{ gr}} = 39,0\% \\ \Delta V &= 15,73 \text{ cm}^3 - 12,11 \text{ cm}^3 = 3,62 \text{ cm}^3 \\P_{H_2O.perdido} &= 3,62 \text{ cm}^3 * 1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 3,62 \text{ gr} \\LC &= \frac{28,38 \text{ gr} - 20,41 \text{ gr} - 3,62 \text{ gr}}{20,41 \text{ gr}} * 100\% = 21,3\%\end{aligned}$$

Se grafican los valores obtenidos y se comparan con el Límites Líquido y el Límite Plástico obtenidos previamente.

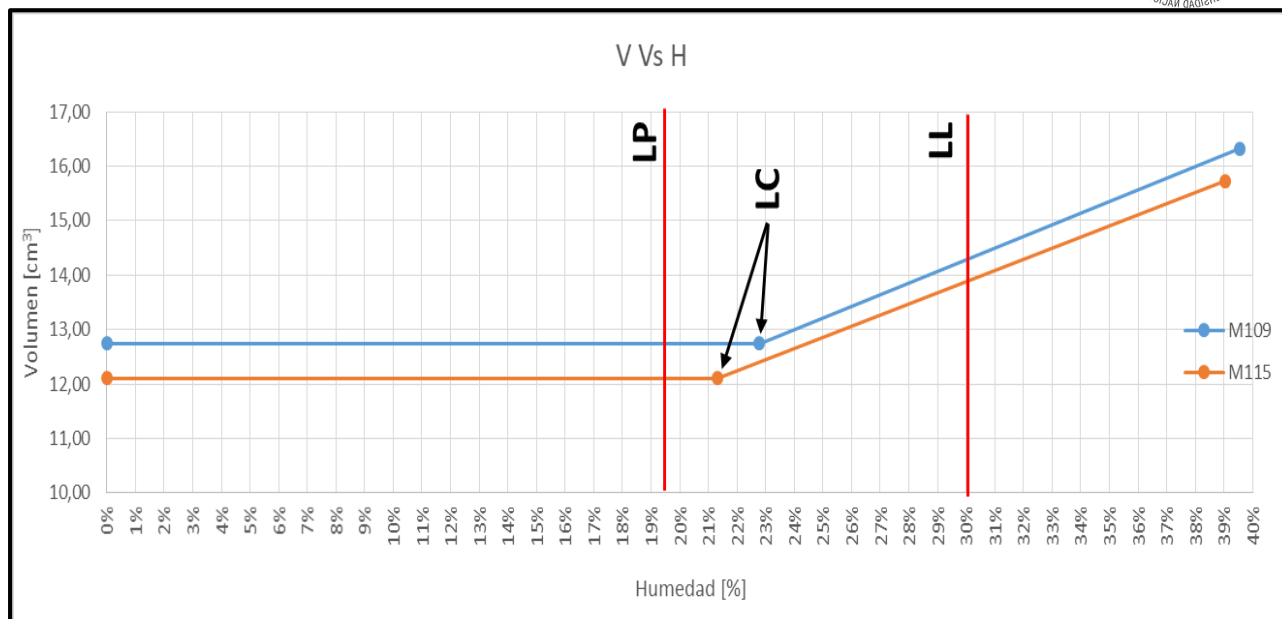


Imagen 16: Gráfico de evolución del volumen ante la evolución del contenido de humedad en el suelo

Como puede observarse los valores de Límite de Contracción se encuentran por encima del valor, esto no es posible debido a que por definición de Límite de Contracción y de Límite Plástico y aceptando los estados de consistencia comprendidos entre estos límites, el Límite de Contracción, nunca podría ser más grande que el Límite Plástico, por lo tanto el límite plástico debe ser mayor al límite de contracción. Por esto se concluye que el resultado del ensayo es defectuoso y no se obtiene un límite de contracción real para el suelo 139-24.

Esta aseveración puede corroborarse calculando el peso específico de la fase sólida con los parámetros de este ensayo y compararlo con el calculado en la sección específica de esta característica.

$$G'_s = \frac{P'_s}{V'_s}$$

Para el cálculo se tendrá que:

$$P'_s = P_{ss}$$

$$V'_s = V_{ss} - \Delta V \text{ Se resta el volumen dejado por el agua evaporada al volumen de la pastilla seca.}$$

$$G'_{s1} = \frac{21,28 \text{ gr}}{12,75 \text{ cm}^3 - 3,57 \text{ cm}^3} = 2,319 < 2,719$$

$$G'_{s2} = \frac{20,41 \text{ gr}}{12,11 \text{ cm}^3 - 3,62 \text{ cm}^3} = 2,405 < 2,719$$

Como se observa el peso específico de la fase sólida es menor al calculado previamente, esto indica que durante el procedimiento de conformación de las pastillas de suelo en las capsulas se cometió un error, el cual podría obedecer a un defecto involuntario de desaireado de burbujas de aire lo cual aumenta el volumen de las mismas pero no su peso como contenido de agua.



CLASIFICACIÓN DEL SUELO

H.R.B.

Para la clasificación del suelo de la muestra 139-24 se utiliza el sistema de clasificación de suelos H.R.B. (Highway Research Board) utilizado para obras de ingeniería. La clasificación se hace según los parámetros indicados en la Tabla 6: Tabla resumen de la Clasificación de suelos por el sistema H.R.B. (Fuente: Normas de ensayos - Vialidad Nacional)..

CLASIFICACIÓN GENERAL	SUELOS GRANULARES Pasa tamiz IRAM 75 Micrones (N° 200) hasta el 35 %			SUELOS ARCILLO-LIMOSOS Pasa tamiz IRAM 75 Micrones (N° 200) más del 35 %			
	A-1	A-3 ⁽¹⁾	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7
CLASIFICACIÓN POR GRUPOS							
Ensayo de tamizado por vía húmeda. Porcentaje que pasa por:							
Tamiz IRAM de 2 mm. (N° 10)	-	-	-	-	-	-	-
Tamiz IRAM 425 micrones (N° 40)	Máx. 50	Min. 51	-	-	-	-	-
Tamiz IRAM 75 micrones (N° 200)	Máx. 25	Máx. 10	Máx. 35	Min. 36	Min. 36	Min. 36	Min. 36
Características de la fracción que pasa el tamiz IRAM 425 micrones (N° 40):							
Límite Líquido (LL)				Máx. 40	Min. 41	Máx. 40	Min. 41
Índice Plástico (IP)	Máx. 6	Sin plast.	-	Máx. 10	Máx. 10	-	Min. 11
COMPORTAMIENTO COMO SUBRASANTE	Excelente a bueno			Regular a pobre			

Tabla 6: Tabla resumen de la Clasificación de suelos por el sistema H.R.B. (Fuente: Normas de ensayos - Vialidad Nacional).

Una vez que se determina el grupo al que pertenece el suelo analizado, se debe calcular su índice de grupo (IG).

$$IG = (F - 35) * [0,2 + 0,005 * (LL - 40)] + 0,01 * (F - 15) * (IP - 10)$$

Donde:

F: Porcentaje de material que pasa a través del tamiz IRAM 75 micrómetros (N°200).

LL: Límite Líquido.

IP: Índice plástico.

Se consideran entonces las siguientes características físicas del suelo:

Muestra 1:

Pasante tamiz N°10: 99% >51%

Pasante tamiz N°40: 93% >51%

Pasante tamiz N°200: 47,7% >36%

LL: 30 <40

IP: 10,5 >10

$$IG = (47,7 - 35) * [0,2 + 0,005 * (30 - 40)] + 0,01 * (47,7 - 15) * (10,5 - 10) = 2,07$$



Con esto la muestra 1 del suelo 139-24 se clasifica como:

A-6 (2)

Para la muestra 2 se tiene:

Muestra 2:

Pasante tamiz N°10: 99%	>51%
Pasante tamiz N°40: 94%	>51%
Pasante tamiz N°200: 48%	>36%
LL: 30	<40
IP: 10,5	>10

$$IG = (47,7 - 35) * [0,2 + 0,005 * (30 - 40)] + 0,01 * (47,7 - 15) * (10,5 - 10) = 2,07$$
$$IG = 2$$

Con esto la muestra 1 del suelo 139-24 se clasifica como:

A-6 (2)

Se clasifica entonces al suelo 139-24 como A-6 (2).

S.U.C.S.

También se caracteriza el suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), para ellos también se cuenta con un gráfico resumen en el cual se tienen los parámetros de clasificación presentado como Anexo: Tabla de Clasificación SUCS en la página 93. Además se tiene una carta de plasticidad en la cual se consideran los límites del material.

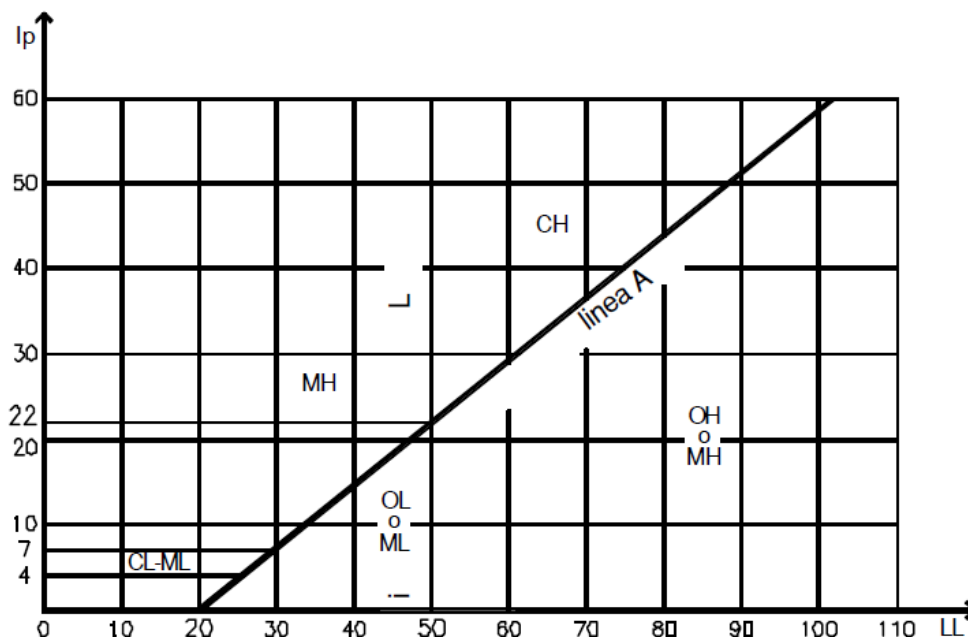


Imagen 17: Carta de plasticidad (Fuente: SUCS).



Los suelos se clasifican por este sistema como:

GW: Grava bien graduada.	SC: Arena Arcillosa.
GP: Grava pobremente graduada.	ML: Limo.
GM: Grava Limosa.	CL: Arcilla.
GC: Grava Arcillosa	OL: Limo/Arcilla orgánico/a LL<50.
SW: Arena bien graduada.	MH: Limo de alta plasticidad.
SP: Arena pobremente graduada.	CH: Arcilla de alta plasticidad.
SM: Arena Limosa.	OH: Limo/Arcilla orgánico/a LL>50.

Muestra 1:

Pasante tamiz N°200: 47,7%

Pasante tamiz N°10: 99% >50%

Pasante tamiz N°40: 93% >50% Con lo que se considera al suelo como arena.

LL: 30 <40

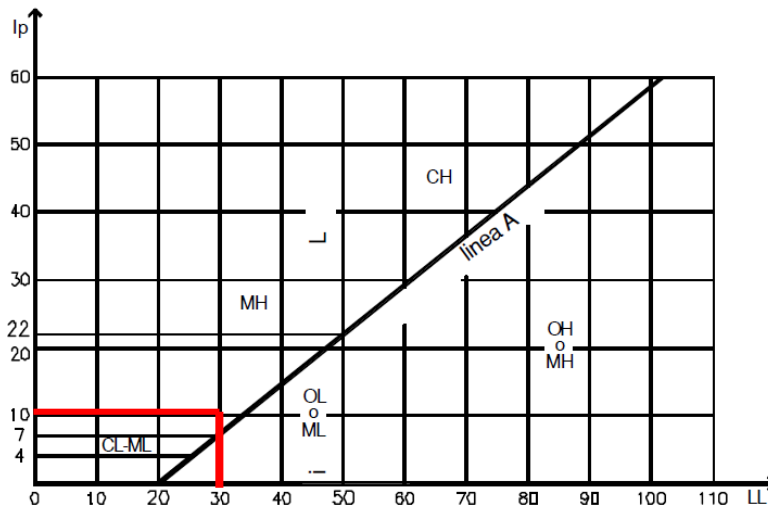
IP: 10,5 >10

13- Pasante tamiz N°200<50% Con lo que se considera como suelo de partículas gruesas.

14- Pasante tamiz N°40>50% Con lo que se considera al suelo como arena.

15- Pasante tamiz N°200>12%

16- Análisis por carta de plasticidad:



El punto indicado por el Límite Líquido y el Índice de plasticidad se encuentra por encima de la línea A.

17- $IP > 7$

Se clasifica la muestra 1 como **SC: Arena Arcillosa**.



Muestra 2:

Pasante tamiz N°200: 48%

Pasante tamiz N°10: 99% >50%

Pasante tamiz N°40: 94% >50% Con lo que se considera al suelo como arena.

LL: 30 <40

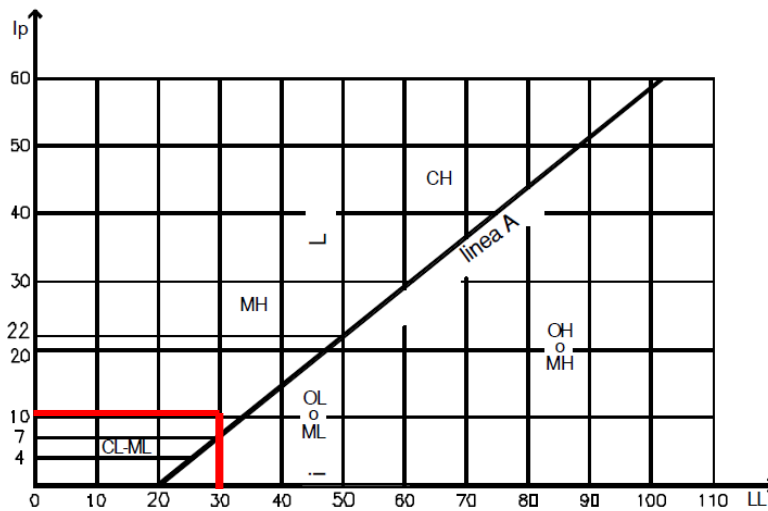
IP: 10,5 >10

18- Pasante tamiz N°200<50% Con lo que se considera como suelo de partículas gruesas.

19- Pasante tamiz N°40>50% Con lo que se considera al suelo como arena.

20- Pasante tamiz N°200>12%

21- Análisis por carta de plasticidad:



El punto indicado por el Límite Líquido y el Índice de plasticidad se encuentra por encima de la línea A.

22- IP>7

Se clasifica la muestra 2 como **SC: Arena Arcillosa**.

Por el sistema de clasificación S.U.C.S. se tiene que el suelo 139-24 se considera como:

SC: Arena Arcillosa

COMPACTACIÓN

T99

El siguiente ensayo realizado analiza la evolución de la densidad para una misma energía de compactación con distintos contenidos de humedad. De esta manera se puede obtener la humedad óptima con la cual se obtiene la máxima densidad seca. Este ensayo se encuentra detallado en las Normas de Ensayo VN-E5-93 de Vialidad Nacional.

Elementos a utilizar:

- Tamiz IRAM 4,75mm N°4.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 10 centigramos.
- Balanza con sensibilidad de 5 gramos.
- Molde cilíndrico de acero para compactación.
- Pisón de compactación de 2,5 kg con una altura de caída de 30,5cm.
- Bandeja de hierro de 660x400x100mm.
- Bandeja de hierro galvanizado de 300x150x50mm.
- Cucharas y espátulas para el manejo de material.
- Elementos para adición de agua a las muestras de suelo.
- Bolsas plásticas.
- Prensa de extracción de probetas.
- Cuchillo de acero con una hoja de al menos 20cm.
- Estufa para secado de muestras con temperatura regulable de entre 105°C y 110°C.

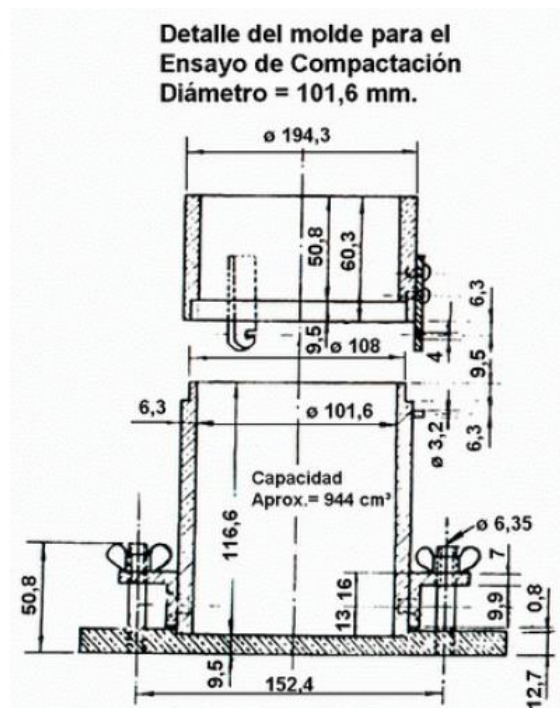


Imagen 18: Detalle molde para ensayo de compactación (Fuente: Normas de Ensayo - Vialidad Nacional).

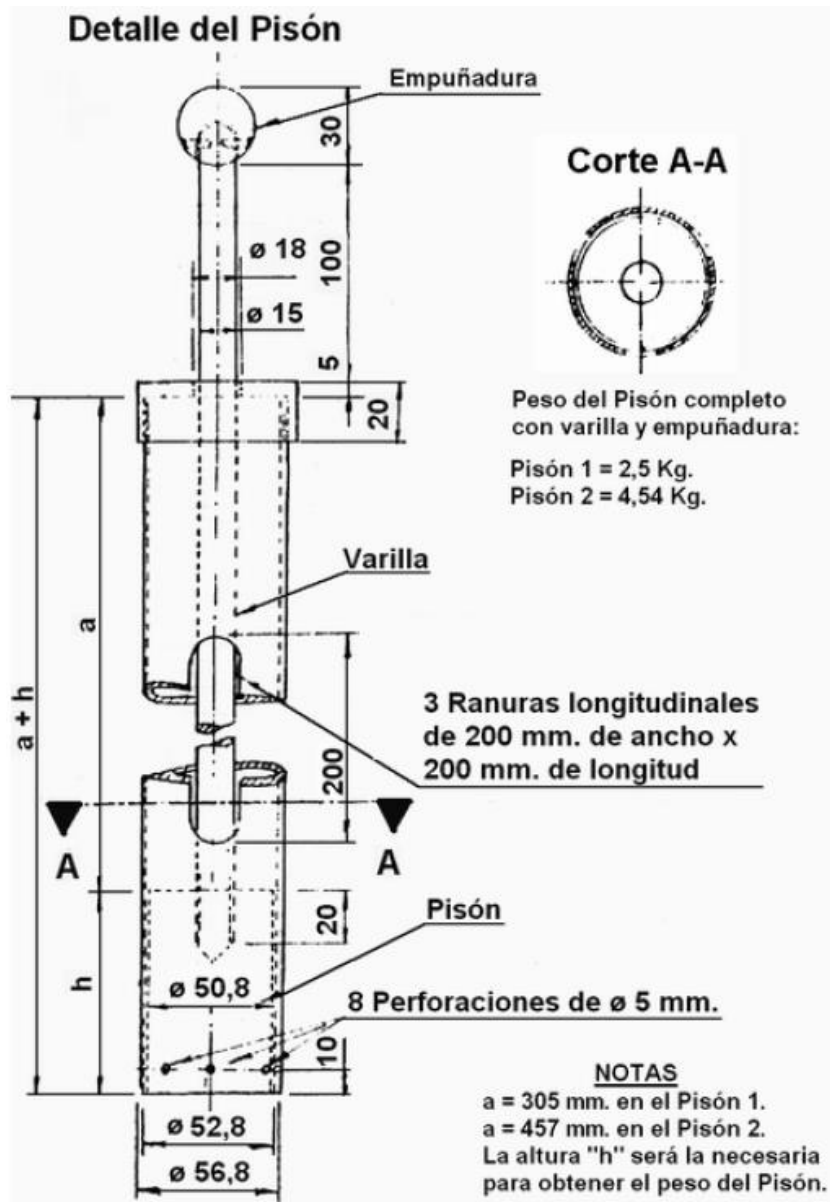


Imagen 19: Detalle Pisón utilizado para compactar (Fuente: Normas de ensayos - Vialidad Nacional).



Imagen 20: Elementos utilizados para el ensayo.



Preparación de la muestra:

Se toma una muestra de 10kg por cuarteo de suelo secado al aire y se lo hace pasar por el tamiz IRAM 4,75 mm (N°4). Y se toma una muestra de 500gr del material en estado natural y se lleva al horno para secar a 105°C-110°C hasta obtener un peso constante y de esta manera obtener la humedad natural de la muestra. Al mismo tiempo, el suelo se divide en muestras de 2kg y se las guarda en bolsas plásticas para evitar la pérdida de la humedad obtenida.

$$P_{sh} = 500,00gr$$

$$P_{ss} = 434,03gr$$

$$H_{nat} = \frac{500gr - 434,03gr}{434,03gr} * 100\% = 15,2\%$$

Procedimiento:

- 1- Se toma una de las muestras de 2kg y se vierte la misma en la bandeja de hierro de 660x400x100mm.
- 2- Se agrega el agua necesaria para obtener la humedad requerida, esta se calcula como:

$$\Delta P_{H_2O} = \frac{P_{nat}}{1 + H_{nat}} * (1 + H_{req}) - P_{nat} + 5gr$$

Se le agregan 5gr adicionales de agua considerando la pérdida de humedad durante la manipulación del material.

- 3- Se guarda el material preparado nuevamente en la bolsa plástica y se lo deja reposar al menos 24h (buscando que se genere una maceración u homogeneización de la humedad en el suelo, en especial en este tipo de suelo de partículas finas).
- 4- Se pesa el molde de compactación sin la base y sin el collar.
- 5- Se procede con la compactación, la misma se hace en 3 capas de suelo, donde la última debe quedar al menos a la mitad de la altura del collar del molde. En cada capa se aplicarán 25 golpes con el pisón de 2,5kg desde una altura de 30,5cm.



Imagen 21: Compactación de probetas con pisón.

- 6- Finalizada la compactación se extrae el collar y se enraza el material en el cuerpo del molde, también se extrae la base del mismo y se pesa el cuerpo del molde junto con el material compactado en la balanza con sensibilidad de 5gr.

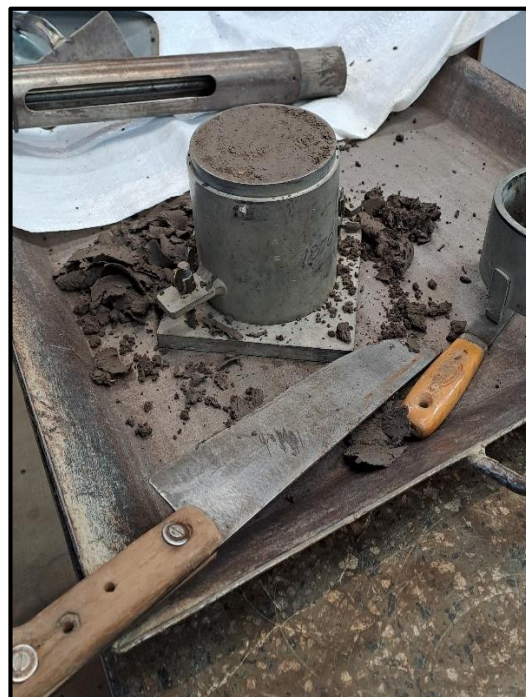


Imagen 22: Enraizado de la probeta.

- 7- Se extrae la probeta de suelo con la prensa de extracción y utilizando el cuchillo se extrae una muestra de 500gr de la zona más cercana al núcleo de la probeta.



Imagen 23: Prensa de extracción de probetas.



Imagen 24: Probeta extraída del molde.

- 8- Se lleva la muestra a secar al horno a 105°C-110°C hasta peso constante y se pesa el material seco, de esta manera se obtiene la humedad real de la probeta.



Imagen 25: Muestras de suelo 139-24 secadas hasta peso constante.

Para el suelo 139-24 se preparan 5 muestras para las siguientes humedades y el agua a agregar:

1- 18%:

$$\Delta P_{H_2O\ 18\%} = \frac{2000\text{gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,18) - 2000\text{gr} + 5\text{gr} = 54\text{gr}$$

2- 20%:

$$\Delta P_{H_2O\ 20\%} = \frac{2000\text{gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,2) - 2000\text{gr} + 5\text{gr} = 88\text{gr}$$

3- 22%:

$$\Delta P_{H_2O\ 22\%} = \frac{2000\text{gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,22) - 2000\text{gr} + 5\text{gr} = 123\text{gr}$$

4- 24%:

$$\Delta P_{H_2O\ 24\%} = \frac{2000\text{gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,24) - 2000\text{gr} + 5\text{gr} = 158\text{gr}$$

5- 26%:

$$\Delta P_{H_2O\ 26\%} = \frac{2000\text{gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,26) - 2000\text{gr} + 5\text{gr} = 193\text{gr}$$

Las características del molde utilizado son:

$$P_{molde} = 1865\text{gr}$$

$$V_{molde} = 946,4\text{cm}^3$$

La energía específica con la que se compactará las probetas se calcula como:

$$E_s = \frac{N^{\circ}\text{golpes} * P_{pison} * h_{caida} * N^{\circ}\text{capas}}{V_{molde}}$$

$$E_{s.T99} = \frac{25 * 2,5\text{kg} * 30,5\text{cm} * 3}{946,4\text{cm}^3} = 6,04 \frac{\text{kg} * \text{cm}}{\text{cm}^3}$$



Resultados:

	Punto	H. Sup	P. mues humeda	P.mues seca	H. Real	P.molde + Psh	P.molde	Psh	V.molde	Densidad E. Humedo	Densidad E. Seco
	N°	%	gr	gr	%	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³
T99	1	18	500	421,3	18,7%	3585	1865	1720	946,4	1817	1531
	2	20	500	417,4	19,8%	3645	1865	1780	946,4	1881	1570
	3	22	500	410,3	21,9%	3700	1855	1845	942,6	1957	1606
	4	24	500	406,5	23,0%	3725	1865	1860	946,4	1965	1598
	5	26	500	400,9	24,7%	3715	1865	1850	946,4	1955	1567

Tabla 7: Resultados Ensayo de Compactación T99 (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados obtenidos se vuelcan en el siguiente grafico de forma en que se pueda obtener la humedad óptima y la densidad máxima que se puede obtener.

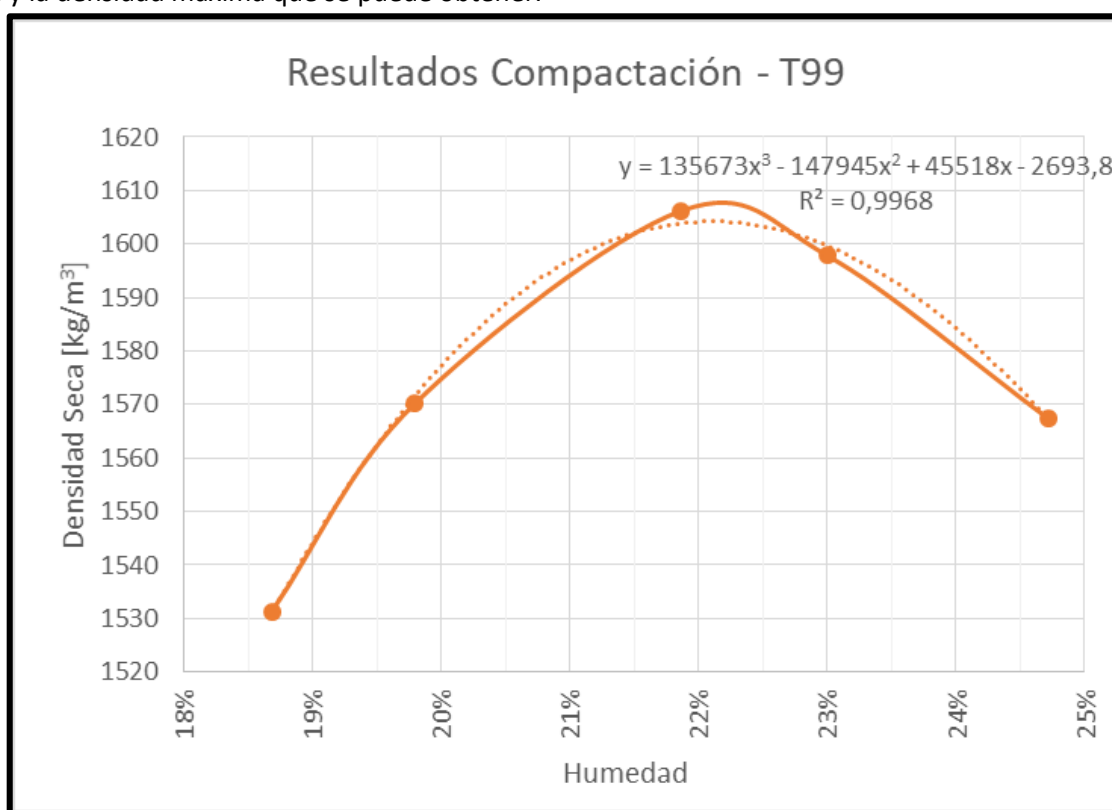


Imagen 26: Grafico de resultados ensayo de compactación T99 (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que la línea de tendencia proyectada sobre los puntos mantiene una relación parabólica, para esta se obtiene una densidad máxima de **1608 gr/cm³** con una humedad óptima de 22%. Además se proyecta con una línea punteada una línea de tendencia resultado de una expresión polinómica de grado 3 con una correlación del 99,68%. La expresión es la siguiente:

$$D_{S.T99} = 135.673 * H^3 - 174.945 * H^2 + 45.518 * H - 2.693,8$$

Para la humedad óptima de 22% mediante la expresión se obtiene la siguiente densidad seca máxima.

$$D_{S.T99}(22\%) = 135.673 * (0,22)^3 - 147.945 * (0,22)^2 + 45.518 * (0,22) - 2.693,8 =$$



$$D_s(22\%) = 1604 \text{ kg/m}^3$$

Obteniéndose una diferencia del 0,23%.

T180

Este ensayo es análogo al ensayo de compactación T99, con la diferencia de que se le aplica una mayor energía de compactación en la conformación de la probeta con lo cual la preparación del material, los elementos a utilizar y el procedimiento son los mismos que los utilizados para el ensayo T99, considerando las siguientes diferencias:

- 9- Se utilizara un pisón de 4,53 kg con una altura de caída de 45,7cm.
- 10- Se mantiene el número de golpes pero se aumenta la cantidad de capas a 5.

Con esto se obtiene la siguiente energía específica:

$$E_s = \frac{N^{\circ} \text{ golpes} * P_{\text{pison}} * h_{\text{caida}} * N^{\circ} \text{ capas}}{V_{\text{molde}}}$$
$$E_{s.T180} = \frac{25 * 4,53 \text{ kg} * 45,7 \text{ cm} * 5}{946,4 \text{ cm}^3} = 27,34 \frac{\text{kg} * \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Se preparan otras 5 muestras de 2kg para el ensayo para las siguientes humedades.

- 1- 15,2%: No se agrega agua ya que se utiliza la humedad natural.
- 2- 17%:

$$\Delta P_{H_2O \ 20\%} = \frac{2000 \text{ gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,17) - 2000 \text{ gr} + 5 \text{ gr} = 36 \text{ gr}$$

- 3- 18%:

$$\Delta P_{H_2O \ 22\%} = \frac{2000 \text{ gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,18) - 2000 \text{ gr} + 5 \text{ gr} = 54 \text{ gr}$$

- 4- 21%:

$$\Delta P_{H_2O \ 24\%} = \frac{2000 \text{ gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,21) - 2000 \text{ gr} + 5 \text{ gr} = 106 \text{ gr}$$

- 5- 23%:

$$\Delta P_{H_2O \ 26\%} = \frac{2000 \text{ gr}}{1 + 0,152} * (1 + 0,23) - 2000 \text{ gr} + 5 \text{ gr} = 140 \text{ gr}$$



	Punto	H. Sup	P. mues humeda	P.mues seca	H. Real	P.molde + Psh	P.molde	Psh	V.molde	Densidad E. Humedo	Densidad E. Seco
T180	1	15,2	500	432,6	15,6%	3710	1870	1840	946,4	1944	1682
	2	17	500	429,6	16,4%	3775	1870	1905	946,4	2013	1729
	3	18	500	424,2	17,9%	3815	1855	1960	942,6	2079	1764
	4	21	500	415,9	20,2%	3810	1870	1940	946,4	2050	1705
	5	23	500	410,9	21,7%	3780	1870	1910	946,4	2018	1659

Tabla 8: Resultados Ensayo de Compactación T180 (Fuente: Elaboración propia).

Nota: Para el punto 3 se utilizó un molde distinto, por ello los valores de peso y volumen de molde son diferentes al resto de los puntos.

Los resultados obtenidos se vuelcan en el siguiente grafico de forma en que se pueda obtener la humedad óptima y la densidad máxima que se puede obtener con el nuevo valor de energía de compactación aplicada.

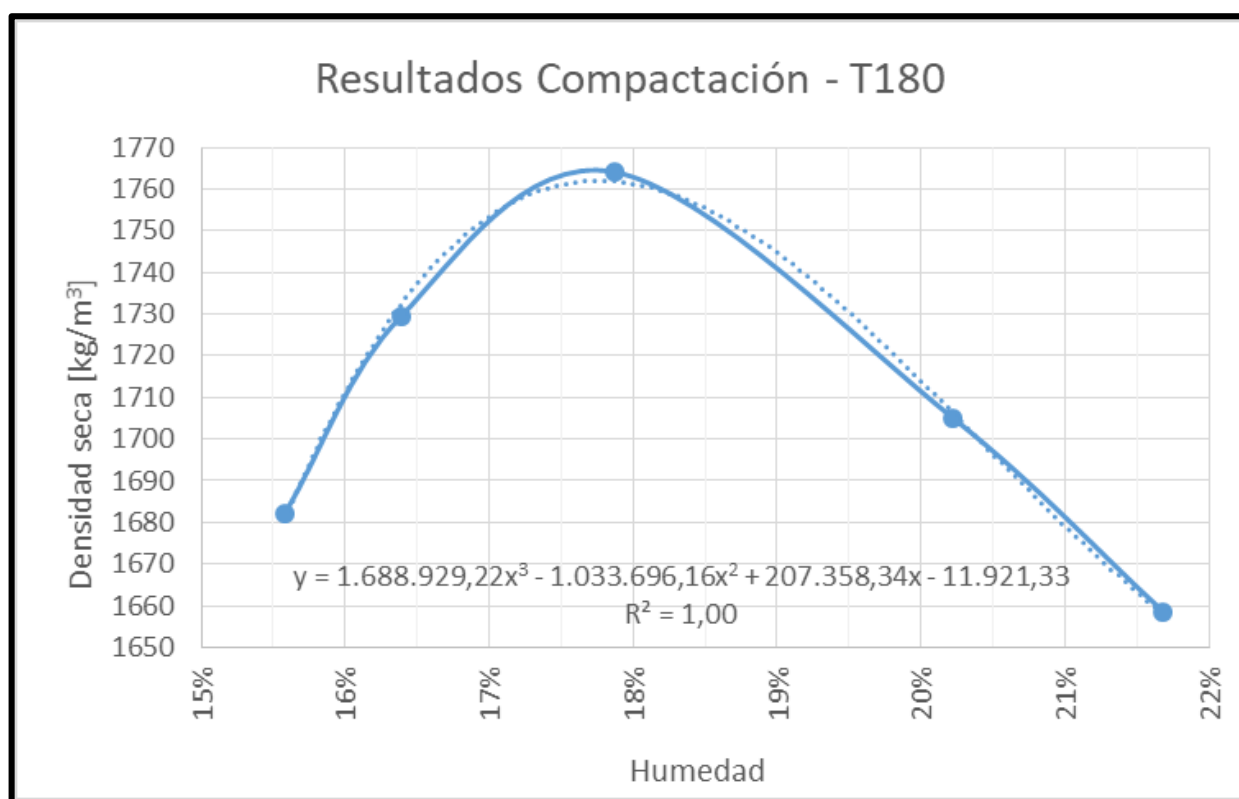


Imagen 27: Grafico de resultados ensayo de compactación T180 (Fuente: Elaboración propia).

Para el ensayo de compactación T180 sobre las muestras de suelo 139-24 se obtiene una densidad seca máxima de 1765 gr/cm^3 para la humedad óptima de 17,8%. Para estos resultados se tiene también una línea de tendencia resultado de una expresión polinómica de grado 3 con una correlación del 100%. La expresión es la siguiente:

$$D_{S.T180} = 1.688.929,22 * H^3 - 1.033.696,16 * H^2 + 207.358,34 * H - 11.921,33$$

Para la humedad óptima de 17,8% mediante la expresión se obtiene la siguiente densidad seca máxima.

$$D_{S.T180} = 1.688.929,22 * (17,8)^3 - 1.033.696,16 * (17,8)^2 + 207.358,34 * 17,8 - 11.921,33$$



$$D_{s.T180}(17,8\%) = 1762 \text{ kg/m}^3$$

Obteniéndose una diferencia del 0,16%.

Un parámetro a considerar al analizar las curvas de compactación es la curva de saturación, esta se conforma teniendo en cuenta los valores de densidad seca obtenida tanto para el ensayo T99 como del ensayo T180.

La humedad de saturación se calcula de la siguiente manera para cada punto:

$$D_{sat} = D_s + \frac{G_s - D_s}{G_s}$$

$$H_{sat} = \frac{D_{sat} - D_s}{D_s}$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Humedad de Ensayo	Dsec	Dsat	Dsec	Dsat	Humedad de Saturación
%	gr/cm3	gr/cm3	Kg/m3	Kg/m3	%
18,7%	1,531	1,968	1531	1968	28,5%
24,7%	1,567	1,991	1567	1991	27,0%
19,8%	1,570	1,993	1570	1993	26,9%
23,0%	1,598	2,010	1598	2010	25,8%
21,7%	1,659	2,049	1659	2049	23,5%
15,6%	1,682	2,063	1682	2063	22,7%
20,2%	1,705	2,078	1705	2078	21,9%
16,4%	1,729	2,093	1729	2093	21,0%

Tabla 9: Valores para curva de Saturación (Fuente: Elaboración propia).

Se puede entonces graficar las curvas de los ensayos junto con la curva de saturación:

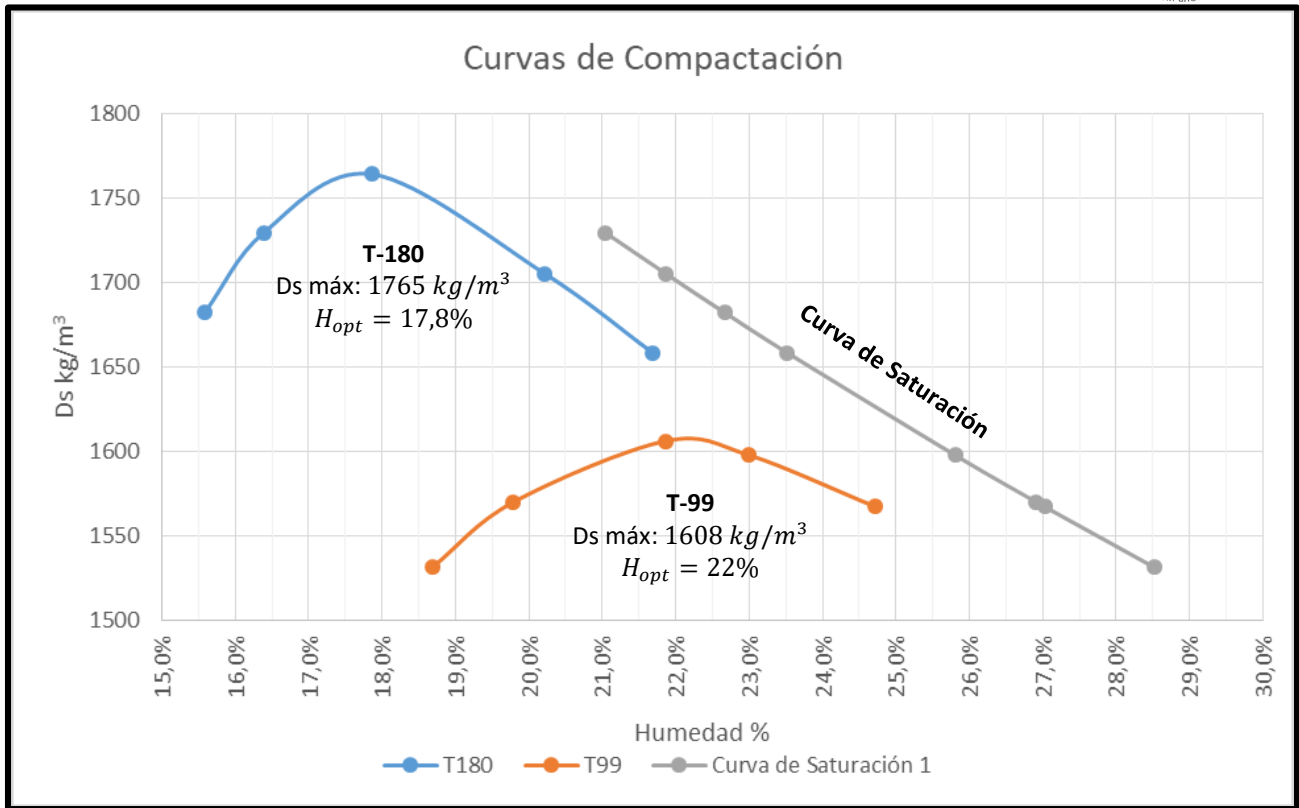


Imagen 28: Curvas de compactación resultado de los ensayos T99 y T180 (Fuente: Elaboración propia).

$$\Delta D_s [\%] = \frac{D_{sT180} - D_{sT99}}{D_{sT99}} * 100 = \frac{1765 \text{ kg/m}^3 - 1608 \text{ kg/m}^3}{1608 \text{ kg/m}^3} * 100 = 9,76\%$$

Se tiene que la densidad seca máxima obtenida por el ensayo T180 es un 9,76% mayor que la obtenida para el ensayo T99.



VALOR SOPORTE E HINCHAMIENTO DE SUELOS

El siguiente ensayo se hace para conocer los siguientes parámetros:

- 1- Valor Soporte Relativo: Es la resistencia que ofrece una probeta de suelo al punzado bajo ciertas condiciones de densificación y humedad. Los resultados obtenidos se expresan como porcentaje respecto de un suelo patrón.
- 2- Hinchamiento: Es el aumento porcentual de la altura de la probeta, referido a su altura inicial, cuando se aumenta la humedad de la misma por inmersión.

Se hará uso del método de ensayo estático con carga fija preestablecida, con lo cual el ensayo de hinchamiento se hará colocando discos sobre las probetas previamente a la inmersión.

Elementos a utilizar:

- Molde de compactación cilíndrico de acero de 152mm de diámetro interno para valor soporte de 2086 cm^3 .
- Pisones de compactación de 4,53kg y 2,5kg.
- Tamiz IRAM 4,75mm N°4.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 10 centigramos.
- Balanza con sensibilidad de 5 gramos.
- Pisón de compactación de 2,5 kg con una altura de caída de 30,5cm.
- Bandeja de hierro de 660x400x100mm.
- Bandeja de hierro galvanizado de 300x150x50mm.
- Cucharas y espátulas para el manejo de material.
- Elementos para adición de agua a las muestras de suelo.
- Bolsas plásticas.
- Cuchillo de acero con una hoja de al menos 20cm.
- Disco espaciador de acero de 61,2mm de altura.
- Separadores de papel.
- Contenedores para la inmersión de probetas.
- Pesas de 5 lb (2,27kg).
- Plato perforado con vástago regulable.
- Relojes comparadores o flexímetros de 30mm con sensibilidad de 0,01mm.
- Relojes comparadores o flexímetros de 10mm con sensibilidad de 0,01mm.
- Elementos de sujeción a los moldes de las probetas, para los relojes comparadores.
- Prensa mecánica de ensayo.
- Aros dinamométricos de 250kg, 1000kg y 3000kg.

- Pistón de penetración de 49,53mm de diámetro.



Imagen 29: Aros dinamométricos utilizados en el laboratorio.



Imagen 30: Moldes para valor soporte utilizados en el laboratorio.

Preparación de la muestra:

Se toma una muestra de 20kg por cuarteo de suelo secado al aire y se lo hace pasar por el tamiz IRAM 4,75 mm (N°4). Y se toma una muestra de 500gr del material en estado natural y se lleva al horno para secar a 105°C-110°C hasta obtener un peso constante y de esta manera obtener la humedad natural de la muestra. Al mismo tiempo, el suelo se divide en muestras de 4kg y se las guarda en bolsas plásticas para evitar la pérdida de la humedad obtenida.

$$P_{sh} = 500,00gr$$

$$P_{ss} = 430,1gr$$

$$H_{nat} = \frac{500gr - 430,1gr}{430,1gr} * 100\% = 16,2\%$$

Procedimiento:

- 1- Se toma una fracción de 4kg y se vierte la misma en la bandeja de hierro de 660x400x100mm.
- 2- Se agrega el agua necesaria para obtener la humedad requerida, esta se calcula como:



$$\Delta P_{H_2O} = \frac{P_{nat}}{1 + H_{nat}} * (1 + H_{req}) - P_{nat} + 5gr$$

Se le agregan 5gr adicionales de agua considerando la pérdida de humedad durante la manipulación del material.

- 3- Se guarda el material preparado nuevamente en la bolsa plástica y se lo deja reposar al menos 24h (buscando que se genere una maceración u homogeneización de la humedad en el suelo, en especial en este tipo de suelo de partículas finas).
- 4- Se pesa el molde de compactación sin la base y sin el collar.
- 5- Se coloca el disco de acero junto con el separador de papel en la parte inferior del molde con el fin de obtener un espacio al dar vuelta el molde.
- 6- Se compacta el material para la combinación de peso de pisón, cantidad de golpes y cantidad de capas diseñada para el ensayo.
- 7- Finalizada la compactación se extrae el collar y se enraza el material en el cuerpo del molde, también se extrae la base del mismo junto con el disco separador y se pesa el cuerpo del molde junto con el material compactado en la balanza con sensibilidad de 5gr.
- 8- Se da vuelta el cuerpo del molde junto con la probeta colocando la cara enrazada con un separador de papel en la base y se arma el molde con la base y el anillo.

Opcional: Se puede obtener el valor soporte de las probetas sin saturar para lo cual se procede con el ensayo de las probetas en la prensa. Para esto se sigue el procedimiento que se indica a partir del paso 15 hasta el paso 18 sin sumergir las probetas en agua. Luego de esto se continúa desde el paso 9 para obtener los valores para las probetas saturadas.

- 9- Se colocan los moldes en los contenedores para la inmersión separándolos del fondo para permitir que el agua a colocar posteriormente pueda ingresar por los orificios con los que cuentan los moldes en su base.
- 10- Se coloca el plato perforado con dos pesas de 5 lb (4,53kg) como sobrecarga.
- 11- Se colocan los flexímetros para las probetas con sus elementos de sujeción y se dispone la lectura en un valor inicial conocido, preferentemente en 0, con el vástago regulable del plato perforado.
- 12- Se llenan los contenedores con agua hasta que el nivel de la misma sobrepase la altura de las pesas.
- 13- Se toman los datos de hinchamiento para los siguientes tiempos desde la inmersión de las probetas:

- 0min (instante inicial)	- 75min	- 2 días
- 15min	- 90min	- 3 días
- 30min	- 145min	- 4 días
- 45min	- 330min	
- 60min	- 1440min (24hs)	

Se toma el hinchamiento a los 4 días, parámetro válido por norma.



Imagen 31: Moldes preparados para ser sumergidos en agua.

- 14- Una vez terminados los días indicados del ensayo de hinchamiento se retira cada probeta por turno para evaluar el valor soporte en la prensa, de esta manera se evita que las probetas pierdan la humedad de saturación.
- 15- Se prepara la prensa de ensayo colocando el anillo dinamométrico a utilizar, el pistón de penetración, un flexímetro de 10mm en el aro dinamométrico para medir la carga aplicada y un flexímetro de 10mm colocado con su elemento de sujeción al pistón de penetración para medir esta.
- 16- Se coloca la probeta junto con dos discos de 5 lb de sobrecarga, se acciona la prensa hasta que el flexímetro de carga comience a registrar la misma, lo que indica que el pistón de penetración hizo contacto con la superficie de la probeta. Se colocan los flexímetros en 0 para comenzar con el registro.
- 17- Se acciona la prensa con un ritmo de penetración de 1,27mm/minuto. Y se procede a registrar la carga para los siguientes valores de penetración en su respectivo tiempo:

Tiempo	Penetración
[min:seg]	[mm]
00:30	0,64
01:00	1,27
01:30	1,91
02:00	2,54
03:00	3,81
04:00	5,08
06:00	7,62
08:00	10,16

Tabla 10: Valores de penetración para registro de carga.

- 18- Finalizada la carga se retira la probeta y se procede al análisis de los resultados.



Imagen 32: Prensa preparada para ensayar penetración sobre una probeta.

Resultados:

Para el ensayo realizado en el suelo 139-24 se procedió con la penetración de las probetas sin saturar y luego con las probetas saturadas.

Las probetas se conforman con la humedad natural que tiene un valor de 16,2% para las siguientes combinaciones de peso de pisón, cantidad de golpes y cantidad de capas. En la siguiente tabla se indica también la energía específica de compactación.

Muestra	Golpes	P.pisón	Altura	Capas	V.molde	E	E. Esp
	Cant	kg	cm	Cant	cm ³	kg.cm	kg.cm/cm ³
M1	56	4,53	45,7	5	2086	57965,9	27,8
M2	25	4,53	45,7	5	2086	25877,6	12,4
M3	12	4,53	45,7	5	2086	12421,3	6,0
M4	18	2,5	30,5	5	2086	6862,5	3,3
M5	12	2,5	30,5	3	2086	2745,0	1,3

Tabla 11: Energía de compactación de probetas (Fuente: Elaboración propia).

Se realizan las probetas obteniendo las siguientes densidades:



Muestra	P.molde	P.mol+suelo	P.suelo	Dh	H	Ds
	gr	gr	gr	gr/cm ³	%	gr/cm ³
M1	6500	10560	4060	1,946	16,2%	1,675
M2	7230	11070	3840	1,841	16,2%	1,584
M3	6995	10465	3470	1,663	16,2%	1,432
M4	6860	10065	3205	1,536	16,2%	1,322
M5	6995	10090	3095	1,484	16,2%	1,277

Tabla 12: Densidades obtenidas para las probetas (Fuente: Elaboración Propia).

Para la carga, se registran las divisiones indicadas en el flexímetro multiplicando estas por la constante del aro dinamométrico utilizado.

$$Carga [kg] = N_{div} * Cte_{aro}$$

La presión aplicada se obtiene dividiendo la carga registrada sobre el área del pistón.

$$Presión\ aplicada = \frac{Carga}{Area\ pistón}$$

El valor soporte se calcula multiplicando la presión aplicada por el coeficiente indicado para la penetración indicada por el método. Estos coeficientes se aplican para 2,54mm; 5,08mm; 7,62mm y 10,16mm de penetración.

Además, el valor soporte con el cual se clasificará corresponde a 2,54mm de penetración. Si el valor soporte de 5,08mm de penetración, resulta ser mayor que el valor soporte correspondiente a 2,54mm de penetración el ensayo se debería repetir.

$$VS = \frac{Presión\ aplicada}{Coef_{penetración}} * 100$$

Los coeficientes son los siguientes:

N°	Penetración [mm]	Coficiente [kg/cm ²]
1°	2,54	70
2°	5,08	105
3°	7,62	133
4°	10,16	161

Tabla 13: Coeficientes para el cálculo de Valor Soporte (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).

Datos necesarios para el análisis de resultados:

- 1- Constantes de Aros dinamométricos:
 - Aro 250kg: Cte. 0,472 kg/div
 - Aro 1000kg: Cte. 3,086 kg/div
 - Aro 3000kg: Cte. 7,955 kg/div
- 2- Área de pistón de penetración: 19,35 cm²

Probetas No Saturadas:

Para las probetas no saturadas se obtuvieron los siguientes resultados:



Molde N°	Penetración (mm)		0,635	1,270	1,905	2,540	3,810	5,080	7,620	VS	
	Coef									105	133
1 Aro: 3000kg			----	----	90	104	125	145	173	200	61
	Lectura del dial (div)		50	73	90	104	125	145	173	200	
	Lectura Corregida (div)		50	73	90	104	125	145	173	200	
	Carga total aplicada (Kg)		397,75	580,72	715,95	827,32	994,38	1153,48	1376,22	1591,00	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		20,56	30,01	37,00	42,76	51,39	59,61	71,12	82,22	
Valor Soporte					61,08			56,77	53,48	51,07	
2 Aro: 1000kg			44	106	147	182	226	263	*	*	41
	Lectura del dial (div)		44	106	147	182	226	263			
	Lectura Corregida (div)		44	106	147	182	226	263			
	Carga total aplicada (Kg)		135,78	327,12	453,64	561,65	697,44	811,62	-	-	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		7,02	16,91	23,44	29,03	36,04	41,94	-	-	
Valor Soporte					41,47			39,95	-	-	
3 Aro: 1000kg			23	40	56	66	82	97	126	154	15
	Lectura del dial (div)		23	40	56	66	82	97	126	154	
	Lectura Corregida (div)		23	40	56	66	82	97	126	154	
	Carga total aplicada (Kg)		70,98	123,44	172,82	203,68	253,05	299,34	388,84	475,24	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		3,67	6,38	8,93	10,53	13,08	15,47	20,09	24,56	
Valor Soporte					15,04			14,73	15,11	15,25	
4 Aro: 1000kg			20	35	44	51	61	71	82	92	12
	Lectura del dial (div)		20	35	44	51	61	71	82	92	
	Lectura Corregida (div)		20	35	44	51	61	71	82	92	
	Carga total aplicada (Kg)		61,72	108,01	135,78	157,39	188,25	219,11	253,05	283,91	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		3,19	5,58	7,02	8,13	9,73	11,32	13,08	14,67	
Valor Soporte					11,62			10,78	9,83	9,11	
5 Aro: 1000kg			10	18	24	28	34	39	50	59	6
	Lectura del dial (div)		10	18	24	28	34	39	50	59	
	Lectura Corregida (div)		10	18	24	28	34	39	50	59	
	Carga total aplicada (Kg)		30,86	55,55	74,06	86,41	104,92	120,35	154,30	182,07	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		1,59	2,87	3,83	4,47	5,42	6,22	7,97	9,41	
Valor Soporte					6,38			5,92	6,00	5,84	

Tabla 14: Resultados de Valor soporte para Probetas de suelo 139-24 no saturadas (Fuente: Elaboración propia).

Nota: Para el molde M2 no se cuenta con los valores de carga para 7,62mm y 10,16mm debido a que, por un error en la elección del aro dinamométrico, las deformaciones del aro para estos valores de penetración son mayores a la deformación máxima admitida por el aro.

Tomando los datos de penetración y presión aplicada se obtiene el siguiente gráfico.

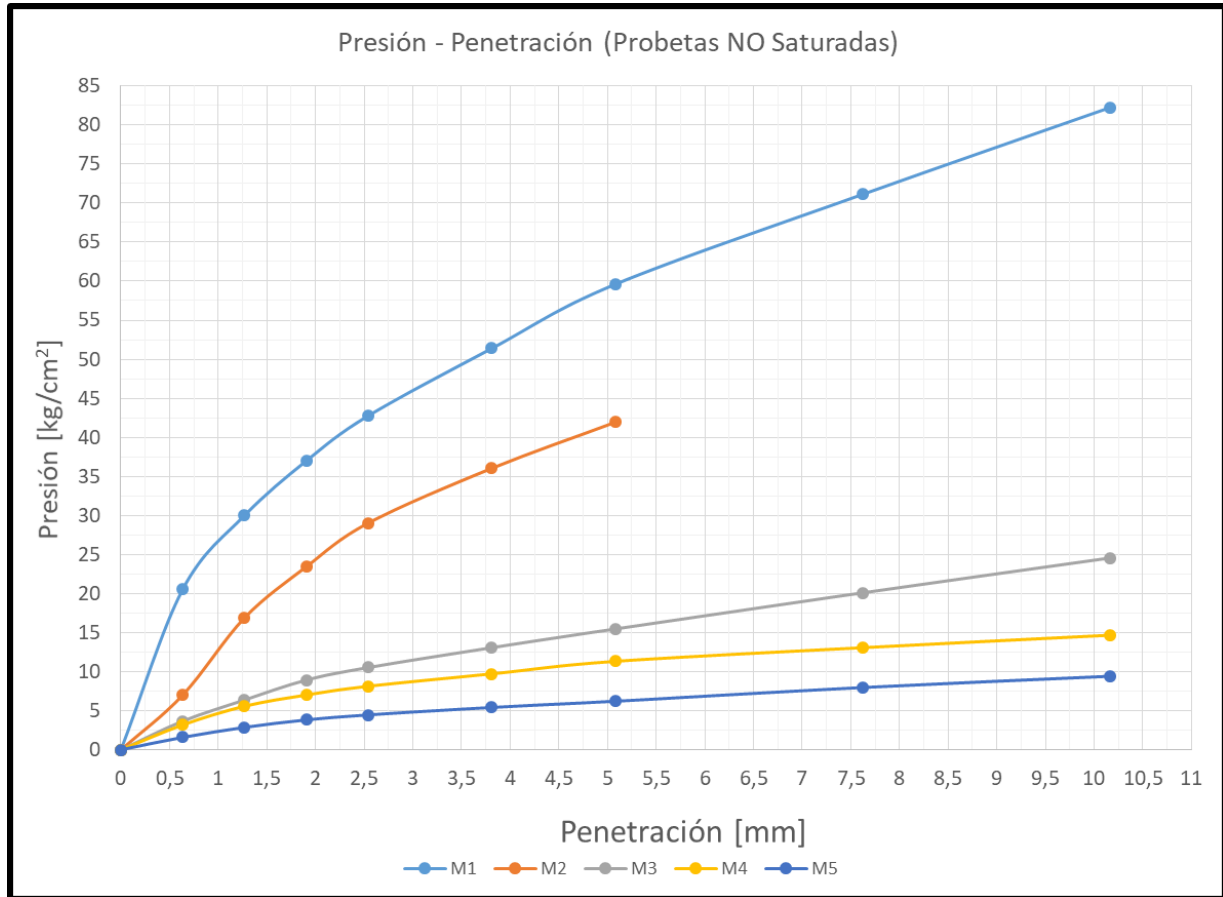


Imagen 33: Grafico de relación Presión vs Penetración para las probetas de suelo 139-24 no saturadas (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que para las probetas de mayor compactación M1 y M2 el suelo admite mayores presiones para mayores valores de penetración, mientras que para probetas con material menos compacto M3, M4 y M5 se observa que la presión adquiere valores asintóticos a partir de los 2mm de penetración.

Si se compara el valor soporte obtenido para las probetas no saturadas, con la densidad seca se obtiene el siguiente gráfico.

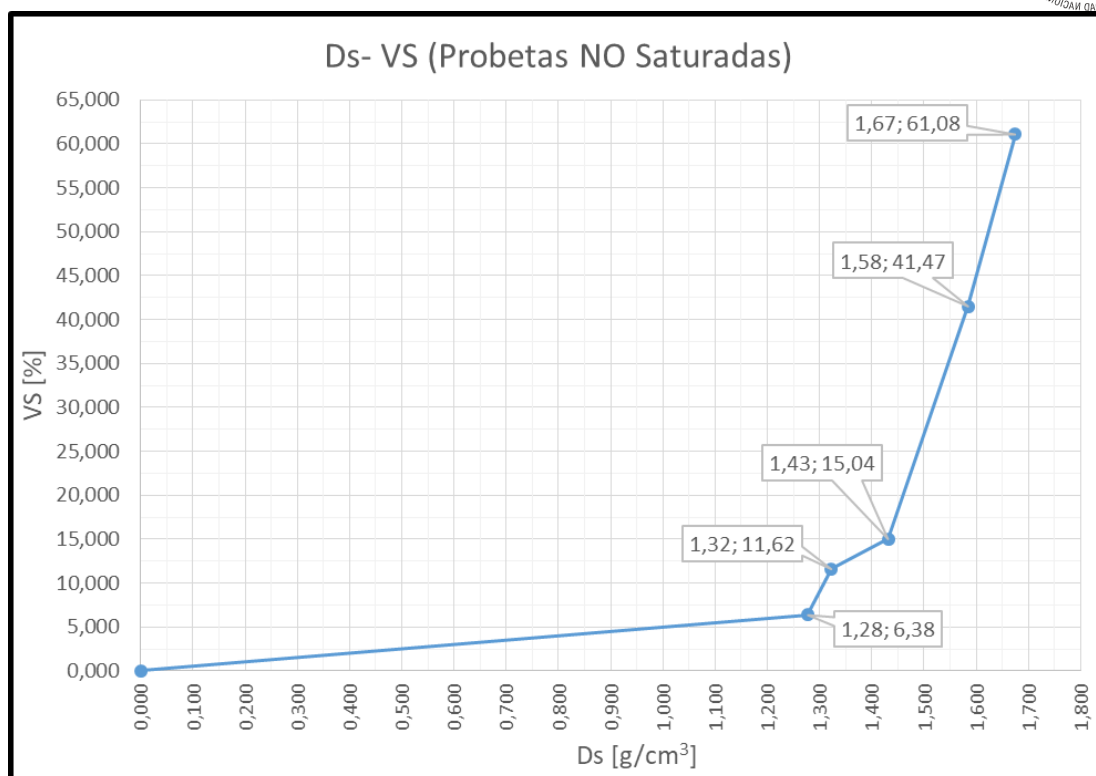


Imagen 34: Grafico de evolución de valor soporte con el aumento de densidad seca de las probetas no saturadas (Fuente elaboración propia).

La curva del grafico indica que para las probetas de suelo 139-24 no saturadas se tiene un pequeño incremento del valor soporte para las densidades entre 0 g/cm^3 y $1,200 \text{ g/cm}^3$ y luego a partir de este valor el valor soporte aumenta rápidamente.

Se tiene que el valor correspondiente a la densidad seca $1,322 \text{ g/cm}^3$ se encuentra por fuera de la forma de curva que se delimita con el resto de los puntos, esto puede deberse a errores tanto en la conformación de la probeta, como la posibilidad de que la humedad de la misma no sea la determinada, por lo que su densidad seca podría variar. También cabe la posibilidad de que el punto en conflicto no sea el indicado previamente, sino el que corresponde a la densidad de $1,277 \text{ g/cm}^3$, por las mismas razones, ambas hipótesis de error son válidas. Para deducir y descartar la lectura errónea se deberían analizar probetas para densidades cercanas a estas.

Probetas Saturadas:

Respecto a las probetas saturadas se tienen los siguientes resultados:



Molde N°	Penetración (mm)		0,635	1,270	1,905	2,540	3,810	5,080	7,620	10,160	VS
	Coef										
1 Aro: 250kg	Lectura del dial (div)		23	40	58	77	110	144	180	215	3
	Lectura Corregida (div)		23	40	58	77	110	144	180	215	
	Carga total aplicada (Kg)		10,86	18,88	27,38	36,34	51,92	67,97	84,96	101,48	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		0,56	0,98	1,41	1,88	2,68	3,51	4,39	5,24	
	Valor Soporte					2,68		3,35	3,30	3,26	
2 Aro: 250kg	Lectura del dial (div)		8	17	30	42	61	83	113	139	1
	Lectura Corregida (div)		8	17	30	42	61	83	113	139	
	Carga total aplicada (Kg)		3,78	8,02	14,16	19,82	28,79	39,18	53,34	65,61	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		0,20	0,41	0,73	1,02	1,49	2,02	2,76	3,39	
	Valor Soporte					1,46		1,93	2,07	2,11	
3 Aro: 250kg	Lectura del dial (div)		10	22	34	45	57	72	90	107	2
	Lectura Corregida (div)		10	22	34	45	57	72	90	107	
	Carga total aplicada (Kg)		4,72	10,38	16,05	21,24	26,90	33,98	42,48	50,50	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		0,24	0,54	0,83	1,10	1,39	1,76	2,20	2,61	
	Valor Soporte					1,57		1,67	1,65	1,62	
4 Aro: 250kg	Lectura del dial (div)		3	7	12	15	22	26	33	41	1
	Lectura Corregida (div)		3	7	12	15	22	26	33	41	
	Carga total aplicada (Kg)		1,42	3,30	5,66	7,08	10,38	12,27	15,58	19,35	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		0,07	0,17	0,29	0,37	0,54	0,63	0,80	1,00	
	Valor Soporte					0,52		0,60	0,61	0,62	
5 Aro: 250kg	Lectura del dial (div)		10	15	21	23	25	28	34	38	1
	Lectura Corregida (div)		10	15	21	23	25	28	34	38	
	Carga total aplicada (Kg)		4,72	7,08	9,91	10,86	11,80	13,22	16,05	17,94	
	Presión aplicada (Kg/cm2)		0,24	0,37	0,51	0,56	0,61	0,68	0,83	0,93	
	Valor Soporte					0,80		0,65	0,62	0,58	

Tabla 15: Resultados de Valor soporte para Probetas de suelo 139-24 saturadas (Fuente: Elaboración propia).

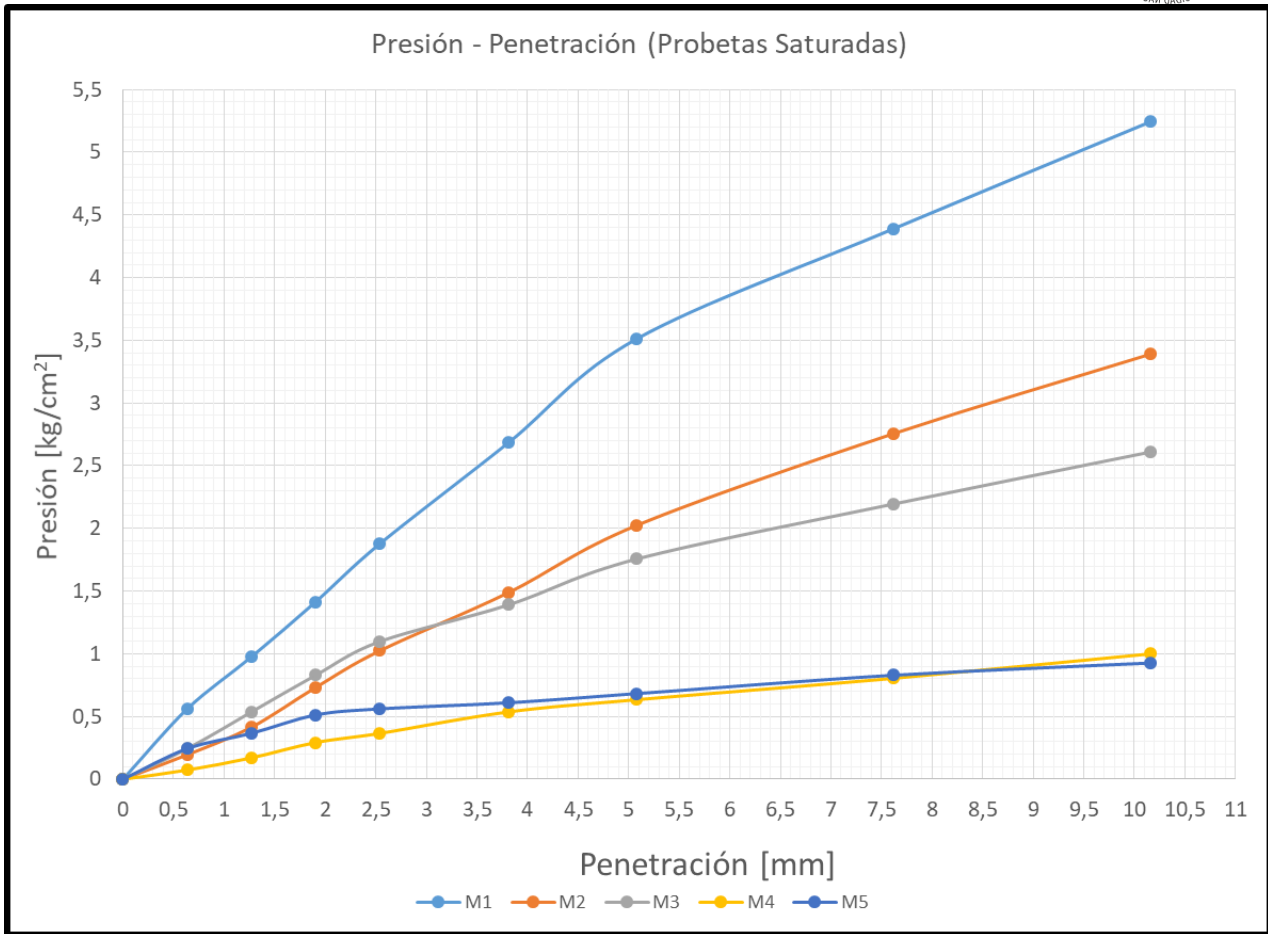


Imagen 35: Grafico de relación Presión vs Penetración para las probetas de suelo 139-24 saturadas (Fuente: Elaboración propia).

Se observa como los valores de las probetas con suelo menos compactados donde el agua penetra con mayor facilidad, los valores de presión aplicada se vuelven asintóticos a partir de los 4mm de penetración, estas probetas son M4 y M5. En las probetas más compactadas, el agua penetra en las capas externas de las mismas, y mantienen el comportamiento indicado para las probetas no saturadas pero con valores mucho menores, en cambio la probeta M3 que para los ensayos con suelo no saturado tiene un comportamiento similar a M4 y M5, cuando el suelo está saturado tiene un comportamiento similar a M1 y M2, esto se debe a que el grado de compactación de la probeta da como resultado que el agua no penetre en capas más profundas de la misma.

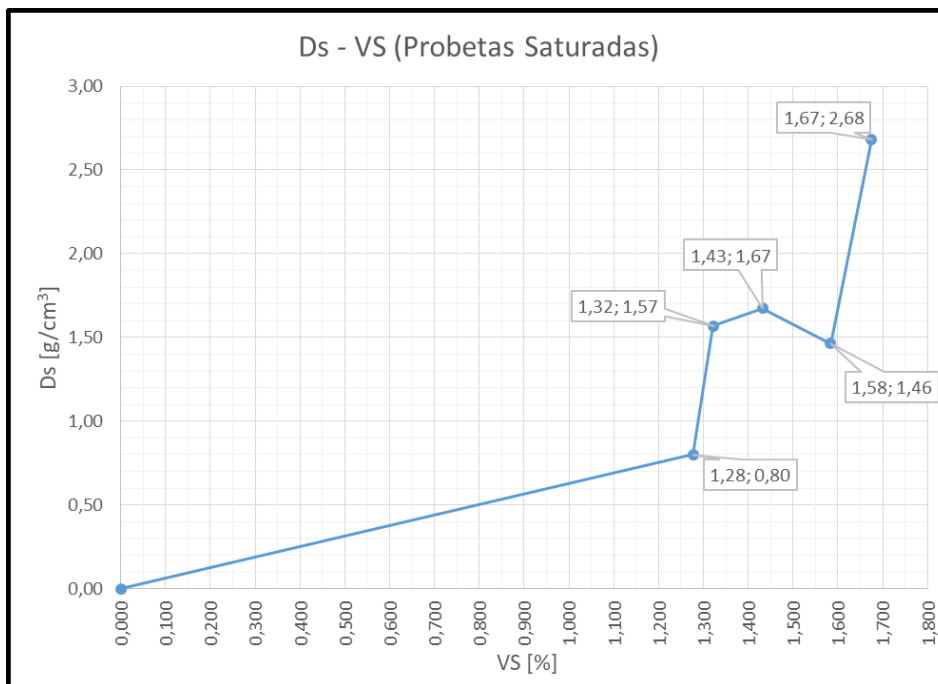


Imagen 36: Gráfico de evolución de valor soporte con el aumento de densidad seca de las probetas saturadas (Fuente elaboración propia).

Como se observa que, al saturar las probetas, pierde la forma obtenida anteriormente dado que más de un punto se sale de la forma de curva, este error se puede deber a la profundidad de saturación alcanzada en probetas de compactación intermedia, donde al agua no penetra de forma homogénea (como para la probeta M5) o penetra homogéneamente a poca profundidad (como en las probetas M1 y M2).

Si se colocan ambas curvas juntas se obtiene el siguiente gráfico:

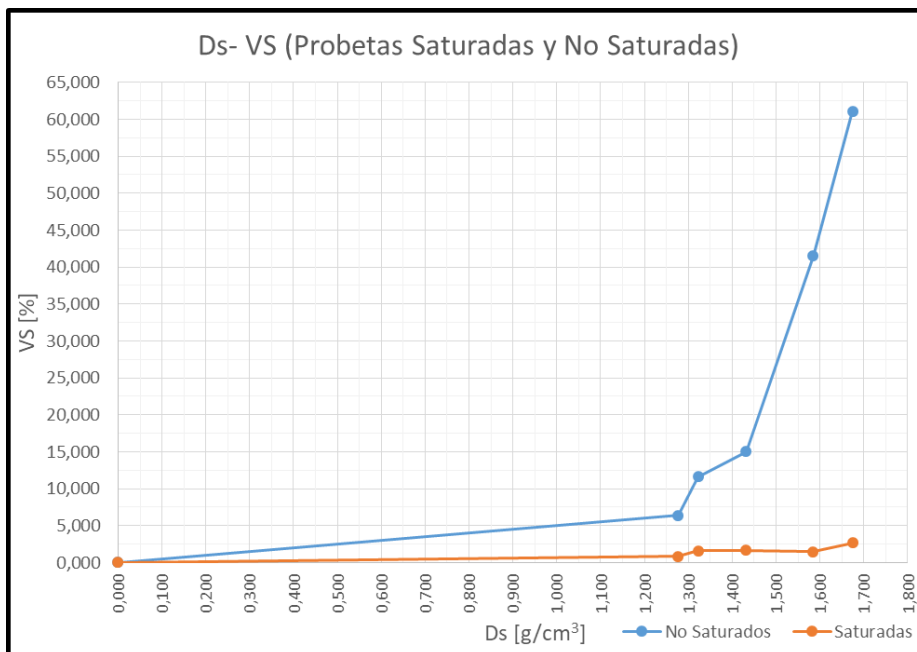


Imagen 37: Comparación de VS obtenido para probetas saturadas y no saturadas según la densidad de las mismas (Fuente: Elaboración propia).

Puede observarse como al saturar las probetas se pierde gran parte de la resistencia del suelo para las densidades mayores, en cambio para bajas densidades la pérdida de resistencia es menor en proporción.



Es importante remarcar que la capacidad portante de un suelo compactado, no solo debe ser mayor al que este tiene en estado natural, sino que además esta capacidad debe permanecer en el tiempo, como se observa en la imagen 37, esto no ocurre con el suelo 139-24, dado que ante la presencia de agua pierde prácticamente la totalidad de su resistencia. Siendo que la presencia de agua, hasta el punto de saturar al suelo es común en la naturaleza, este material no es aconsejable para su uso en fundaciones directas o subrasantes de caminos.

Hinchamiento:

Una vez colocadas las probetas en los recipientes y sumergidas se comienza el registro de datos hasta el 4to día obteniéndose los siguientes resultados:

Registro	ΔH (mm)					Minutos
	M1	M2	M3	M4	M5	
0'	0	0	0	0	0	0
15'	0,40	0,70	1,00	1,61	1,42	15
30'	0,66	1,14	2,12	2,19	1,75	30
45'	0,83	1,57	2,86	2,29	1,82	45
60'	0,98	2,05	3,09	2,34	1,85	60
75'	1,12	2,75	3,22	2,38	1,88	75
90'	1,24	3,22	3,31	2,41	1,90	90
145'	1,98	4,35	3,50	2,50	2,02	150
330'	3,05	5,10	4,62	2,54	2,09	330
3d	7,46	6,51	4,25	2,91	2,38	4320
4d	7,56	6,58	4,30	2,92	2,40	5760

Tabla 16: Resultados de ensayo de hinchamiento de probetas de suelo 139-24 sumergidas (Fuente: Elaboración propia).

Nota: Se observa un salto temporal entre el registro de los 330 minutos y del 3er día, esto se debe a que los valores comprendidos en este lapso de tiempo serían registrados por equipo de grabación durante el fin de semana en el cual el laboratorio donde se llevaron a cabo los ensayos permanecía cerrado, pero el sistema de registro falló. De igual manera los valores obtenidos pueden utilizarse para el análisis.

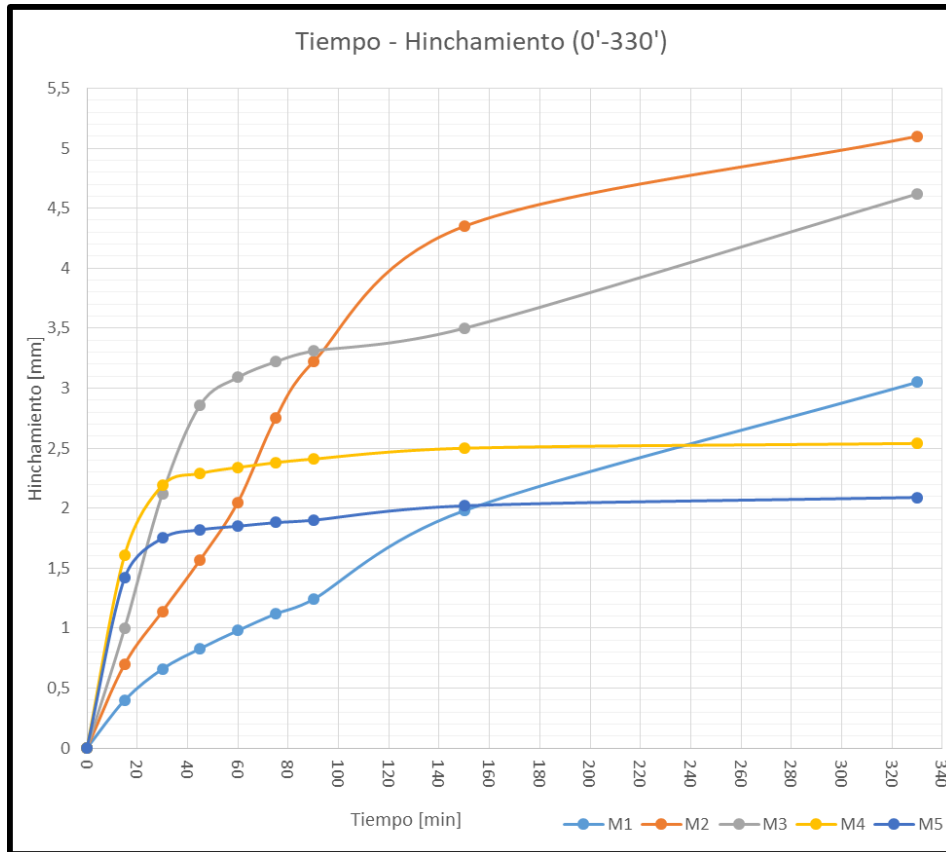


Imagen 38: Gráfico de hinchamiento de las probetas sumergidas de suelo 139-24 en los primeros 330 minutos (Fuente Elaboración propia).

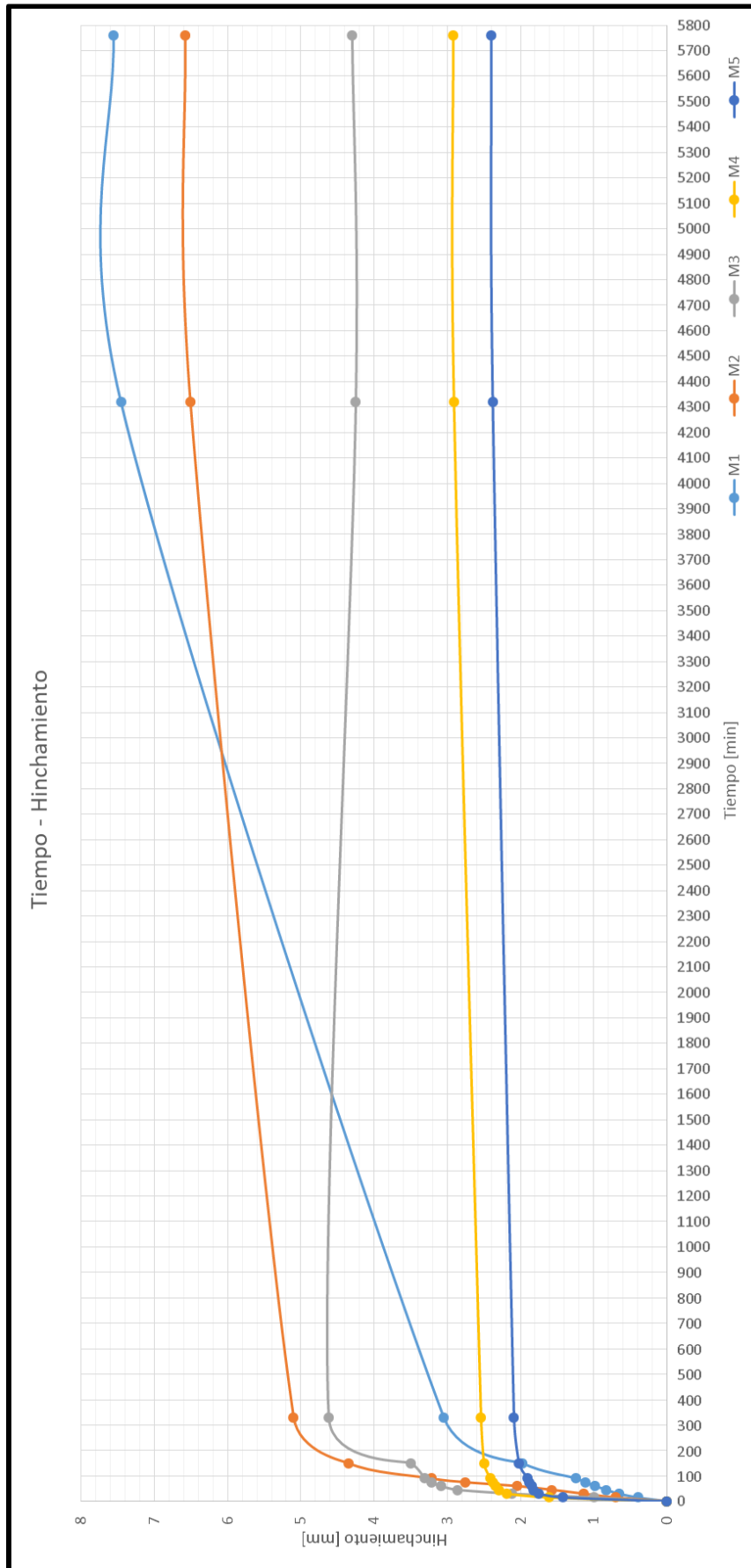


Imagen 39: Gráfico de hinchamiento de las probetas sumergidas de suelo 139-24 (Fuente Elaboración propia).



Se puede observar que se tiene un gran hinchamiento de las probetas en los primeros minutos, siendo las probetas M4 y M5 las de mayor tasa de hinchamiento tienen en los primeros minutos, pero una vez alcanzados los 2mm a 2,5mm de expansión sus curvas se vuelven asintóticas.

Las probetas M2 y M3 las cuales tienen una tasa menor de hinchamiento, pero se expanden casi el doble que las probetas M4 y M5 en un mayor tiempo teniendo también un comportamiento asintótico para los 3 días de inmersión. Además, se observa que la probeta M3 que tiene un grado de compactación medio en relación al resto de probetas, experimenta un pequeño colapso (se interpreta como un derrumbe de la estructura interna del suelo) entre el día 1 y el día 3.

Por último se observa un comportamiento particular en la probeta M1. Ésta, inicialmente tiene una tasa de hinchamiento es muy bajo en comparación al resto de las probetas y es la que menos se expande al comienzo del ensayo, pero con el pasar de los días es la probeta que más expande observándose un comportamiento asintótico en el 4to día. Esto se debe a que, al ser la probeta más compacta, el agua tiene una mayor dificultad para penetrar en el suelo, por lo que en un comienzo las capas que expanden son muy pequeñas, pero a medida que pasa el tiempo y el agua penetra más profundo en la probeta, el agua genera más espacios entre las partículas más compactas.

GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO

Este ensayo, que sigue la norma A.A.S.H.T.O. T88, permite obtener la granulometría de las partículas pasantes el tamiz IRAM 75 micrómetros (N°200) obteniendo de esta manera una curva granulométrica completa del suelo, permitiendo establecer la cantidad relativa de limos, arcillas y coloides.

Elementos a utilizar:

- Tamices IRAM 4,8mm, 2mm, 420 μ , 149 μ y 75 μ (N° 4, 10, 40, 100 y 200).
- Batidora para mezcla de suelos.
- Probetas graduadas de vidrio de 1000ml.
- Tapón de goma para las probetas.
- Termómetro de vidrio.
- Hidrómetro AASHTO T88 151H para medición de densidad específica de sólidos en suspensión. Tiene un rango de 0,995 a 1,038 con divisiones de 0,001, aplicable para líquidos a 20°C.
- Hidrómetro AASHTO T88 152H para medición de densidad de sólidos en suspensión en gramos por litro [g/l]. Tiene un rango de -5 g/l a 60 g/l con divisiones de 1 g/l, aplicable para líquidos a 20°C.
- Agente dispersante $NaPO_3$ denominado Sodio Hexametáfosfato también conocido como Calgón.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 10 centigramos.
- Estufa para secado de muestras con temperatura regulable de entre 105°C y 110°C.



Imagen 40: Hidrómetro tipo (Fuente: Internet).

Preparación de la muestra:

Se toman dos muestras de 50gr cada una de material pasante el tamiz IRAM 2,0 mm (N°10) y sacadas en horno a 105°C – 110°C hasta peso constante.

Procedimiento por muestra:

- 1- Se diluye la muestra de suelo secado a horno en 125ml de solución al 4% de $NaPO_3$. Esta se puede conseguir mezclando 5gr de Hexametáfosfato en suficiente agua hasta completar los 125ml.



Imagen 41: Hexametafosfato utilizado en el laboratorio.

- 2- Se deja asentar la muestra 24hs y luego se coloca la mezcla en el vaso de la batidora, esta se acciona batiendo la mezcla por 1 minuto.



Imagen 42: Izq. Batidora de laboratorio (Fuente: Internet) Der. Material de suelo batido en el laboratorio.

- 3- Se transfiere la mezcla a una probeta graduada de 1000ml y se añade agua hasta completar los 1000ml.

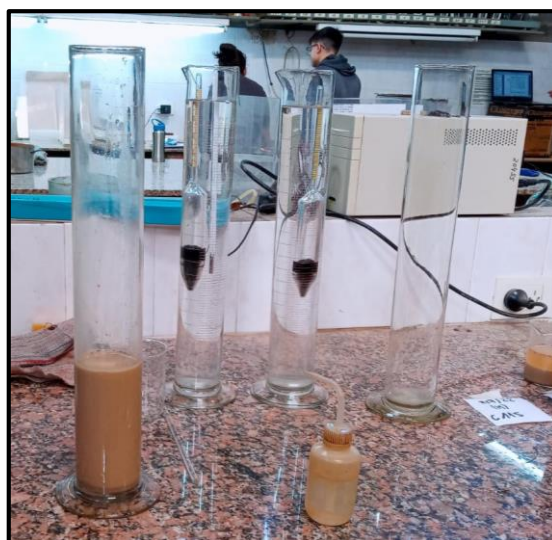


Imagen 43: Probeta con muestra de suelo y probetas auxiliares para contención de hidrómetros y toma de temperatura.



- 4- Se prepara una probeta auxiliar con agua hasta la marca de 1000ml obtenida de la misma fuente que la utilizada para la muestra. En esta probeta se colocará el termómetro para controlar la temperatura de la muestra.
- 5- Se coloca el tapón de goma en la boca de la probeta y tomándola por la base y la boca se agita la misma cuidadosamente por 1 minuto, girándola de arriba abajo con movimiento de inversión.
- 6- Se coloca la probeta sobre la mesa, se extrae el tapón y se introduce el hidrómetro H151 obteniendo las lecturas para 1, 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos. A cada lectura de hidrómetro se debe adjuntar la lectura de la temperatura del agua obtenida de la probeta auxiliar.
- 7- Se repite el procedimiento para la muestra a ser analizada con el hidrómetro H152.
- 8- Posteriormente se efectúa un análisis de granulometría por tamices a cada muestra para obtener los porcentajes pasantes para aberturas mayores a 75μ .

Resultados:

Para las muestras de suelo 139-24 se obtuvieron los siguientes datos:

HIDROMETRO H151:

Hora de Lectura	Tiempo Transcurrido	Temperatura	Lectura en el Hidrómetro
	(min)	(°C)	R
10:01:00	1	22	1,030
10:02:00	2	22	1,029
10:05:00	5	22	1,026
10:15:00	15	22	1,019
10:30:00	30	22	1,016
11:00:00	60	22	1,015
14:10:00	250	22	1,012
10:00:00	1440	22	1,009

Tabla 17: Datos obtenidos del ensayo de la muestra de suelo 139-24 para el hidrómetro H151 (Fuente: Elaboración propia).

Con estos valores se puede obtener el porcentaje de partículas de diámetros menores a 75μ . Previamente se deben hacer correcciones por gravedad específica y por temperatura:

$$G_s = 2,719 \text{ gr/cm}^3$$

El factor de corrección por gravedad específica se calcula de la siguiente manera:

$$a = \frac{2,65 - 1}{2,65} * \frac{G_s}{G_s - 1}$$

Para este suelo el coeficiente a vale:

$$a = \frac{2,65 - 1}{2,65} * \frac{2,719 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}}{2,719 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} - 1} = 0,9846$$

Y el factor de corrección por viscosidad η se obtiene de la viscosidad del agua para la temperatura de la muestra durante el ensayo.



Temperatura °C	Viscosidad [Poises]	Temperatura °C	Viscosidad [Poises]
16	0,01111	24	0,00914
17	0,01083	25	0,00894
18	0,01056	26	0,00874
19	0,01030	27	0,00855
20	0,01005	28	0,00836
21	0,00981	29	0,00818
22	0,00958	30	0,00801
23	0,00936		

Tabla 18: Coeficientes de corrección por viscosidad (Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil. J. Bowles).

La profundidad efectiva L que representa la distancia de caída de las partículas en un intervalo de tiempo. Esta se encuentra tabulada:

Profundidad efectiva para Hidrómetro H151				
R	L		R	L
1,000	163		1,020	110
1,001	160		1,021	107
1,002	158		1,022	105
1,003	155		1,023	102
1,004	152		1,024	100
1,005	150		1,025	97
1,006	147		1,026	94
1,007	144		1,027	92
1,008	142		1,028	89
1,009	139		1,029	86
1,010	137		1,030	84
1,011	134		1,031	81
1,012	131		1,032	78
1,013	128		1,033	76
1,014	126		1,034	73
1,015	123		1,035	70
1,016	121		1,036	68
1,017	118		1,037	65
1,018	115		1,038	62
1,019	113			

Tabla 19: Profundidad efectiva L para el hidrómetro H151 (Fuente: ASTM D422-63).

Con esto el diámetro para cada lectura se calcula mediante la fórmula de Stokes como:

$$D[mm] = \frac{30 * \eta * L/10}{\sqrt{980 * (G_s - 1) * t}}$$

Donde:

η : Coeficiente de corrección por viscosidad.

L: Profundidad efectiva.

t: Tiempo transcurrido.

Además el porcentaje que pasa el diámetro calculado previamente se calcula como:

$$P [\%] = 1606 * (R - 1) * \frac{a}{G_s} * 100$$

Con esto se obtienen los siguientes resultados:



Tiempo Transcurrido (min)	Hora de Lectura	Temperatura (°C)	Lectura en el Hidrómetro <i>R</i>	Factores de Corrección por		Valor de Profundidad Efectiva <i>L</i>	Diámetro (mm)	Porcentaje que pasa el Diámetro (%)
				Gravedad Específica G_s <i>a</i>	Viscosidad η			
1	09:17:00	22	1,016	0,9849	0,00974	121	0,0457	50,6
2	09:18:00	22	1,016	0,9849	0,00974	121	0,0323	50,6
5	09:21:00	22	1,015	0,9849	0,00974	123	0,0207	47,5
15	09:31:00	21	1,014	0,9849	0,00996	126	0,0122	44,3
30	09:46:00	21	1,013	0,9849	0,00996	129	0,0087	41,1
60	10:16:00	20	1,012	0,9849	0,01020	131	0,0063	38,0
250	13:26:00	16	1,010	0,9849	0,01122	137	0,0033	31,6
1440	09:16:00	18	1,008	0,9849	0,01070	142	0,0014	25,3

Tabla 20: Resultados de Diámetro y porcentaje pasante para muestra de suelo 139-24 con hidrómetro H151 (Fuente: Elaboración propia).

HIDRÓMETRO H152:

Para esta muestra se obtuvieron los siguientes datos.

Tiempo Transcurrido (min)	Hora de Lectura	Temperatura (°C)	Lectura en el Hidrómetro <i>R</i>
1	09:40:00	22	23
2	09:41:00	22	22
5	09:44:00	22	21
15	09:54:00	21	20
30	10:09:00	21	19
60	10:39:00	20	17
250	13:49:00	16	17
1440	09:39:00	18	11

Tabla 21: Datos obtenidos del ensayo de la muestra de suelo 139-24 para el hidrómetro H152 (Fuente: Elaboración propia).

En este caso los factores de corrección por gravedad específica y por viscosidad se obtienen de igual manera que para el ensayo realizado con el hidrómetro H151.

Los valores de profundidad efectiva para el ensayo por hidrómetro H152 se encuentran tabulados en la siguiente tabla:



Profundidad efectiva para Hidrómetro H152							
R	L		R	L		R	L
0	163		20	130		40	97
1	161		21	129		41	96
2	160		22	127		42	94
3	158		23	125		43	92
4	156		24	124		44	91
5	155		25	122		45	89
6	153		26	120		46	88
7	152		27	119		47	86
8	150		28	117		48	84
9	148		29	115		49	83
10	147		30	114		50	81
11	145		31	112		51	79
12	143		32	111		52	78
13	142		33	109		53	76
14	140		34	107		54	74
15	138		35	106		55	73
16	137		36	104		56	71
17	135		37	102		57	70
18	133		38	101		58	68
19	132		39	99		59	66
						60	65

Tabla 22: Profundidad efectiva L para el hidrómetro H152 (Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil. J. Bowles).

El diámetro de las partículas se determina con la ecuación de Stokes indicada previamente y el porcentaje de partículas pasantes a cada diámetro se determina como:

$$P [\%] = R * \frac{a}{G_s} * 100$$

Con lo que se obtienen los siguientes resultados:

Tiempo Transcurrido (min)	Hora de Lectura	Temperatura (°C)	Lectura en el Hidrómetro R	Factores de Corrección por		Valor de Profundidad Efectiva L	Diámetro (mm)	Porcentaje que pasa el Diámetro (%)
				Gravedad Específica G _s a	Viscosidad η			
1	09:40:00	22	23	0,9849	0,00974	125	0,0466	45,3
2	09:41:00	22	22	0,9849	0,00974	127	0,0332	43,3
5	09:44:00	22	21	0,9849	0,00974	129	0,0211	41,4
15	09:54:00	21	20	0,9849	0,00996	130	0,0124	39,4
30	10:09:00	21	19	0,9849	0,00996	132	0,0088	37,4
60	10:39:00	20	17	0,9849	0,01020	135	0,0064	33,5
250	13:49:00	16	17	0,9849	0,01122	135	0,0033	33,5
1440	09:39:00	18	11	0,9849	0,01070	145	0,0014	21,7

Tabla 23: Resultados de Diámetro y porcentaje pasante para muestra de suelo 139-24 con hidrómetro H152 (Fuente: Elaboración propia).

Se toman los valores de tamaño de partículas y porcentaje de material pasante y se obtiene el promedio de ambos ensayos.



Tamaño	%P	%P	%P
μ	H151	H152	Prom
46,6	50,6	45	48,0
33,2	50,6	43	47,0
21,1	47,5	41	44,4
12,4	44,3	39	41,8
8,8	41,1	37	39,3
6,4	38,0	33	35,7
3,3	31,6	33	32,6
1,4	25,3	22	23,5

Tabla 24: Material pasante resultante de los ensayos y su promedio (Fuente: Elaboración Propia).

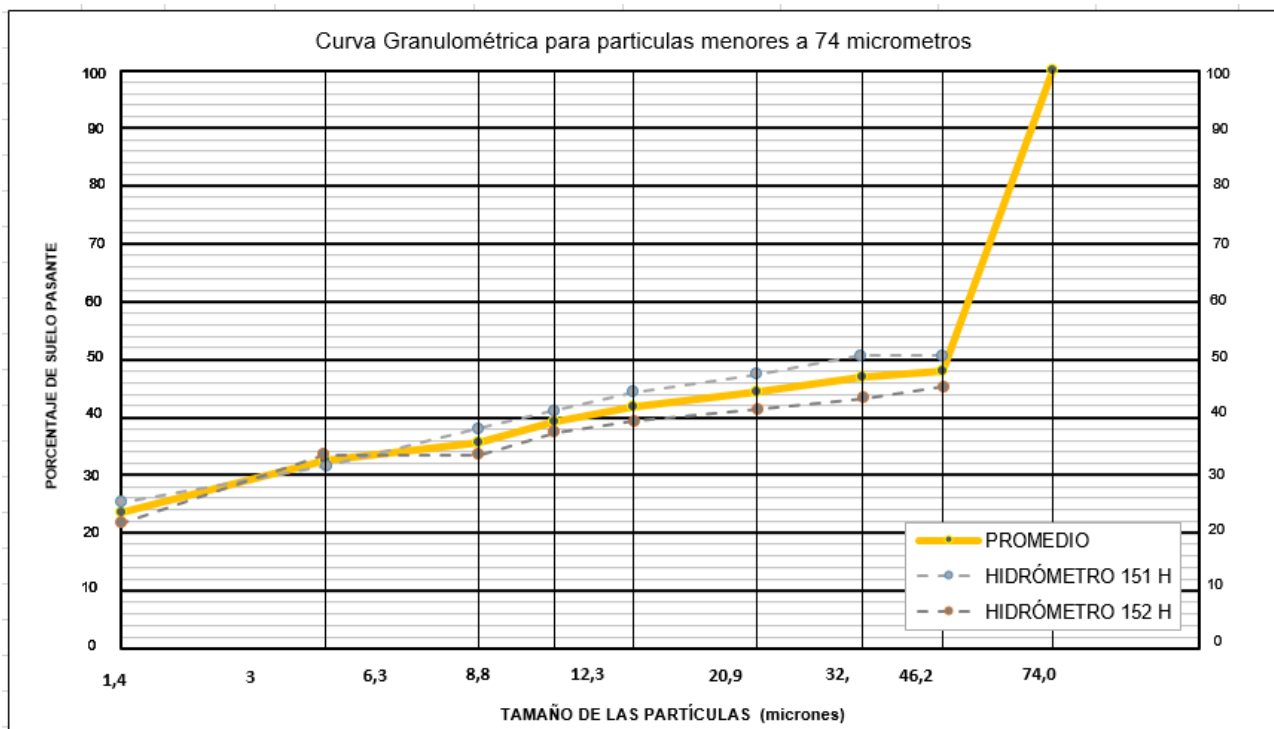


Imagen 44: Curva granulométrica para partículas menores a 75 micrones (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que el 48% del material, en promedio, tiene un tamaño menor a 46,2 micrones, debajo de este valor el material es muy homogéneo.

Luego se secan las muestras en horno a 105°C-110°C hasta peso constante y luego se obtiene la granulometría para las partículas de tamaño mayor a 75 micrones:

Tamiz	Granulométrai H151			Granulométrai H151		
	R	P	%P	R	P	%P
N°	gr	gr		gr	gr	
10	0	50	100	0	50	100
40	2,5	47,5	95	2,7	47,3	94,6
100	14,5	33	66	15	32,3	64,6
200	8,8	24,2	48,4	8,2	24,1	48,2

Tabla 25: Granulometría de partículas con tamaño mayor a 75 micrones (Fuente: Elaboración propia).

Se vuelcan los valore de las granulometrías realizadas con tamices y con hidrómetros sobre las muestras.



Tamiz N°	Granulométrai H151			Granulométrai H151			Promedio		
	R	P	%P	R	P	%P	%P	Diametro	
	gr	gr		gr	gr			μ	mm
10	0	50	100	0	50	100	100	2000	2,0000
40	2,5	47,5	95	2,7	47,3	94,6	94,8	425	0,4250
100	14,5	33	66	15	32,3	64,6	65,3	150	0,1500
200	8,8	24,2	48,4	8,2	24,1	48,2	48,3	74	0,0740
Hidrómetros	-	-	50,6	-	-	45	48,0	46,6	0,0466
	-	-	50,6	-	-	43	47,0	33,2	0,0332
	-	-	47,5	-	-	41	44,4	21,1	0,0211
	-	-	44,3	-	-	39	41,8	12,4	0,0124
	-	-	41,1	-	-	37	39,3	8,8	0,0088
	-	-	38,0	-	-	33	35,7	6,4	0,0064
	-	-	31,6	-	-	33	32,6	3,3	0,0033
-	-	25,3	-	-	22	23,5	1,4	0,0014	

Tabla 26: Resultados de granulometría de las muestras de suelo 139-24 (Fuente: Elaboración propia).

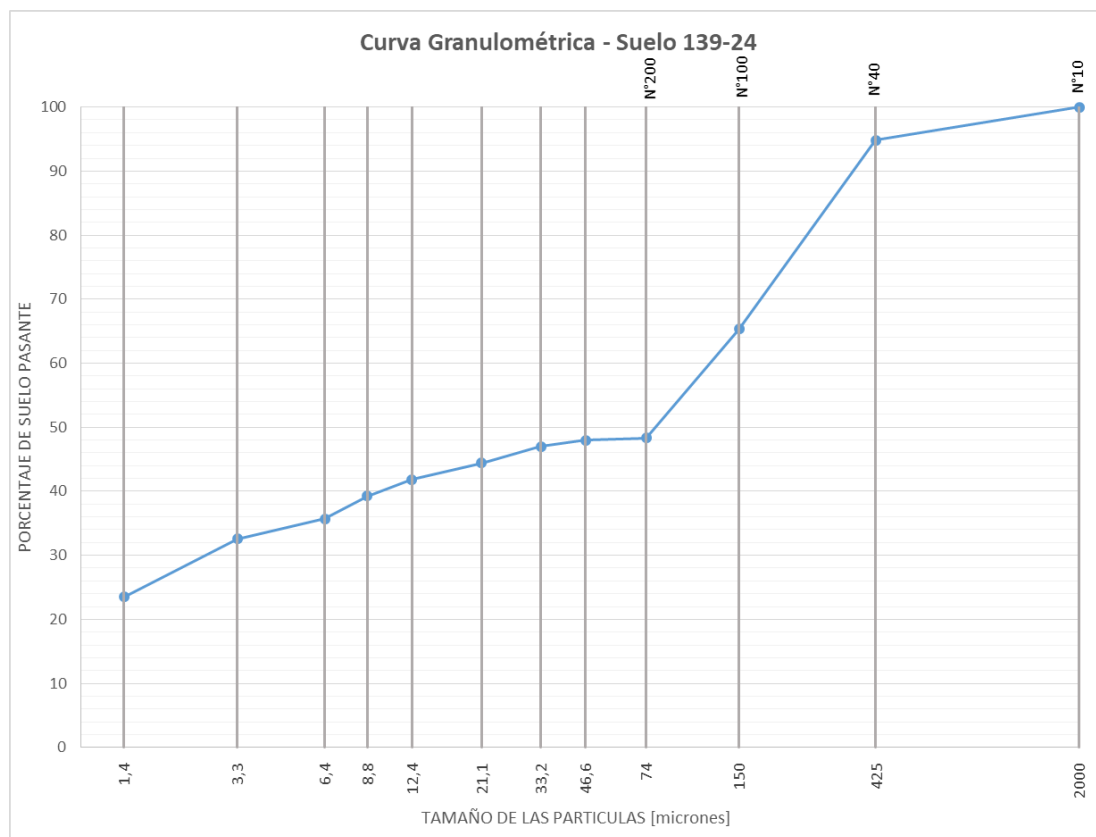


Imagen 45: Curva Granulométrica del suelo 139-24 (Fuente: Elaboración Propia).

Como se observa el suelo analizado está compuesto por un 52% del material con partículas mayores a 74 micrones por lo cual se clasifica como arena, pero tiene una gran parte no mayoritaria de partículas pasantes del tamiz N°200. Además, se tiene que las partículas de tamaño inferior a 0,074 mm (Tamiz N° 200) se clasifican de la siguiente manera según el tamaño de estas:

- 1- Arena: $0,074mm < D_{arena} < 2mm$
- 2- Limo: $0,002mm < D_{limos} < 0,074mm$
- 3- Arcilla: $0,001mm < D_{arcilla} < 0,002mm$
- 4- Coloides: $D_{coloides} < 0,001mm$



Según los porcentajes de material pasante se tienen las siguientes fracciones de tamaño menor a 74 μm componentes de la muestra analizada:

Fracción	%	Característica
Limo	32,6	0,002 < limos < 0,074 mm
Arcilla	18,8	0,001 < arcilla < 0,002 mm
Coloides	48,6	coloides < 0,001 mm

Tabla 27: Fracción de suelo de partículas finas (Fuente: Elaboración propia).

Estos valores porcentuales son obtenidos para la fracción de suelo pasante el tamiz IRAM 74 micrómetros (N°200) y sobre estos se observa que los limos tienen una mayor presencia que las arcillas en la fracción pasante del tamiz indicado, esto se contrasta con la clasificación hecha por el método SUCS por el cual el suelo se clasificó como Arena Arcillosa. También se observa que los coloides tienen una proporción mayor que los limos y arcillas por separado.

Las proporciones sobre el total de la muestra son:

Fracción	%	Característica
Arena	51,7	0,074mm < arenas < 2mm
Limo	15,7	0,002 < limos < 0,074 mm
Arcilla	9,1	0,001 < arcilla < 0,002 mm
Coloides	23,5	coloides < 0,001 mm

Tabla 28: Proporción de partículas sobre la totalidad de la muestra (Fuente: Elaboración propia).

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD EN EL CAMPO

El siguiente ensayo corresponde a la norma de Vialidad Nacional VN-E8-66, y tiene como finalidad determinar el peso unitario del suelo en estado natural o compactado en el caso de utilizarse en trabajos de obras viales.

Elementos a utilizar:

- Cono de escurrimiento de material de medición de volumen.
- Bandeja de hierro con orificio central.
- Cortafierros, cucharas, espátulas y herramientas para excavación y extracción de material.
- Balanza con sensibilidad de 1gr.
- Frascos con cierre hermético.
- Arena retenida por el tamiz IRAM 600 micrómetros N°30 y pasante por el tamiz IRAM 1,18mm N°16, con densidad conocida.
- Bolsas plásticas para recoger el material extraído.
- Horno para secado de muestras de 105°C-110°C.

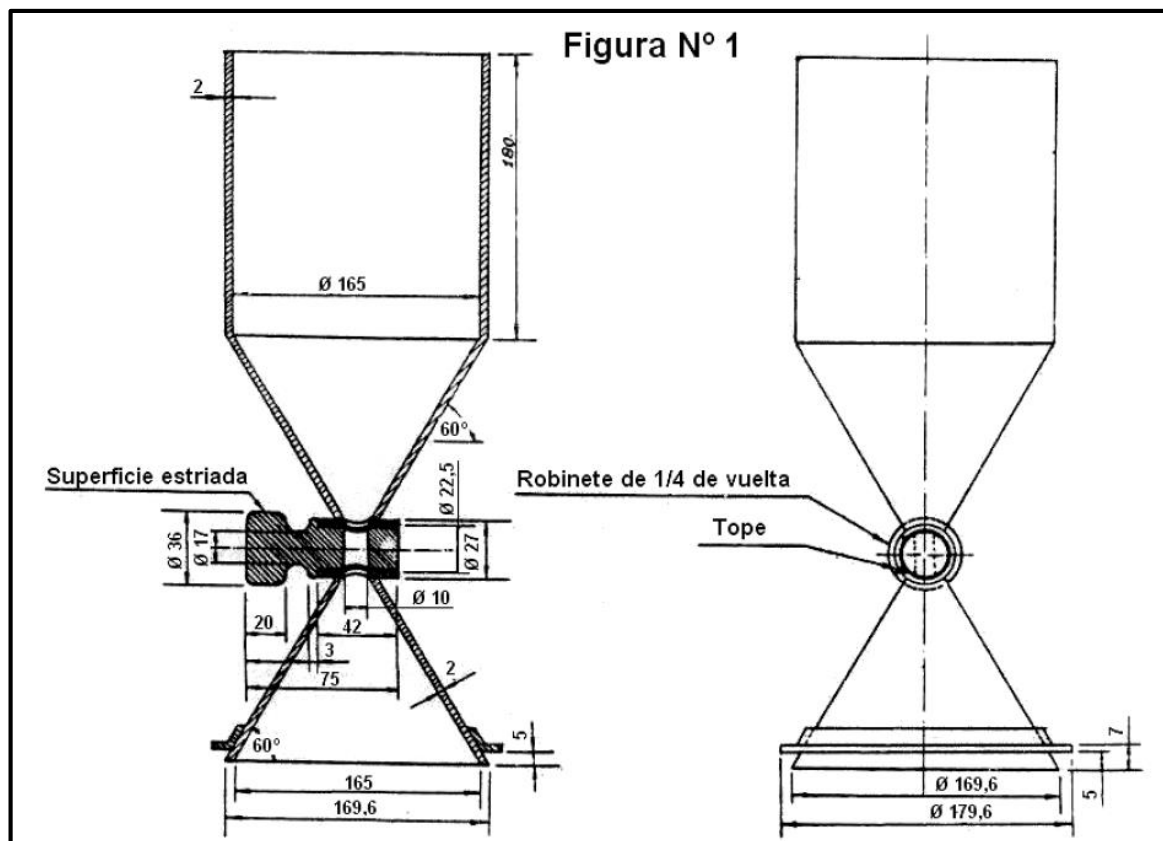


Imagen 46: Corte y vista del cono utilizado para la determinación de densidad de material en campo (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).

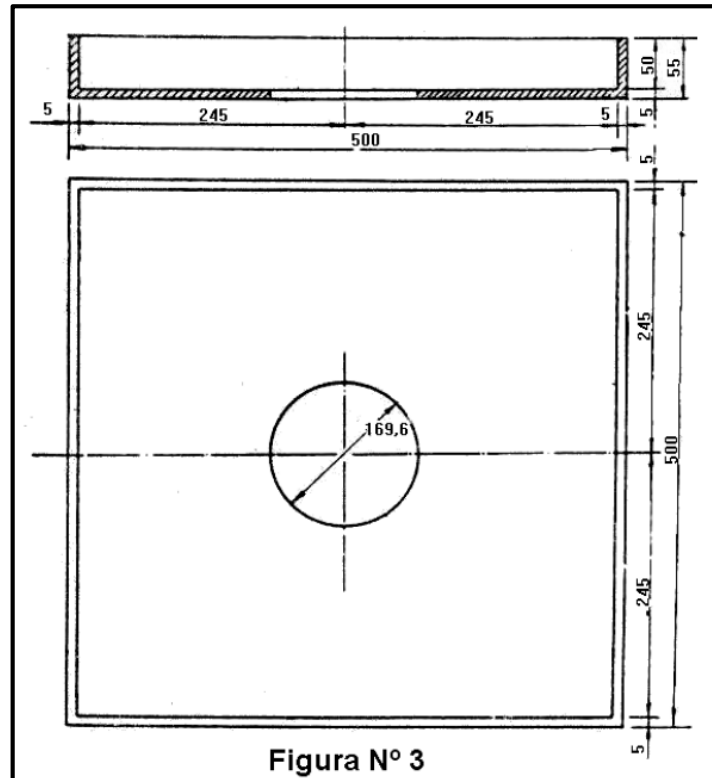


Figura N° 3

Imagen 47: Corte y planta de la bandeja utilizada para la determinación de densidad de material en campo (Fuente: Normas de Ensayos - Vialidad Nacional).

Procedimiento:

- 1- Se retira una capa superficial entre 1 a 2cm retirando material suelto por exposición y generando una superficie plana para la colocación de la bandeja de hierro.



Imagen 48: Colocación de la bandeja de hierro en el terreno.

- 2- Una vez colocada la bandeja de hierro, se procede a excavar un hoyo cilíndrico de diámetro similar al orificio de la bandeja y una profundidad cercana a los 15cm.



Imagen 49: Excavación del hoyo y retiro de material.

- 3- El material retirado se coloca en una bolsa plástica la cual una vez finalizada la excavación se cierra herméticamente para evitar la pérdida de la humedad natural de la muestra, también se puede utilizar frascos con cierre hermético.
- 4- Se coloca el cono sobre la bandeja de hierro en el orificio de la misma y se cierra el robinete. Luego se colocan 6kg de arena de densidad conocida en el cono.



Imagen 50: Izq. Colocación del cono en la bandeja Der. Colocación de la arena en el cono.

- 5- Se abre el robinete permitiendo que la arena ingrese en el hoyo y el volumen inferior del cono. Se debe tener cuidado de que en la zona cercana no existan equipos que produzcan vibraciones o personal caminando que produzcan que la arena se reordene, produciendo errores en el ensayo ya que ingresa más arena en el hoyo.
- 6- Una vez que la arena deja de caer, se cierra el robinete y se recupera en frascos herméticos el sobrante. En frascos o bolsas separadas se recupera también el material que ingresó en el hoyo para su posterior limpieza para ser reutilizado.
- 7- El material extraído se pesa y se seca en el horno a 105°C-110°C hasta peso constante y se pesa el suelo en estado seco para obtener la humedad natural del mismo.

Resultados:

Para este ensayo se obtuvieron dos nuevas muestras de suelo a 780m al norte del punto de extracción del suelo 319-24. Estas muestras son del mismo material del suelo original y se las identifica como suelo 312-24 y 313-24.

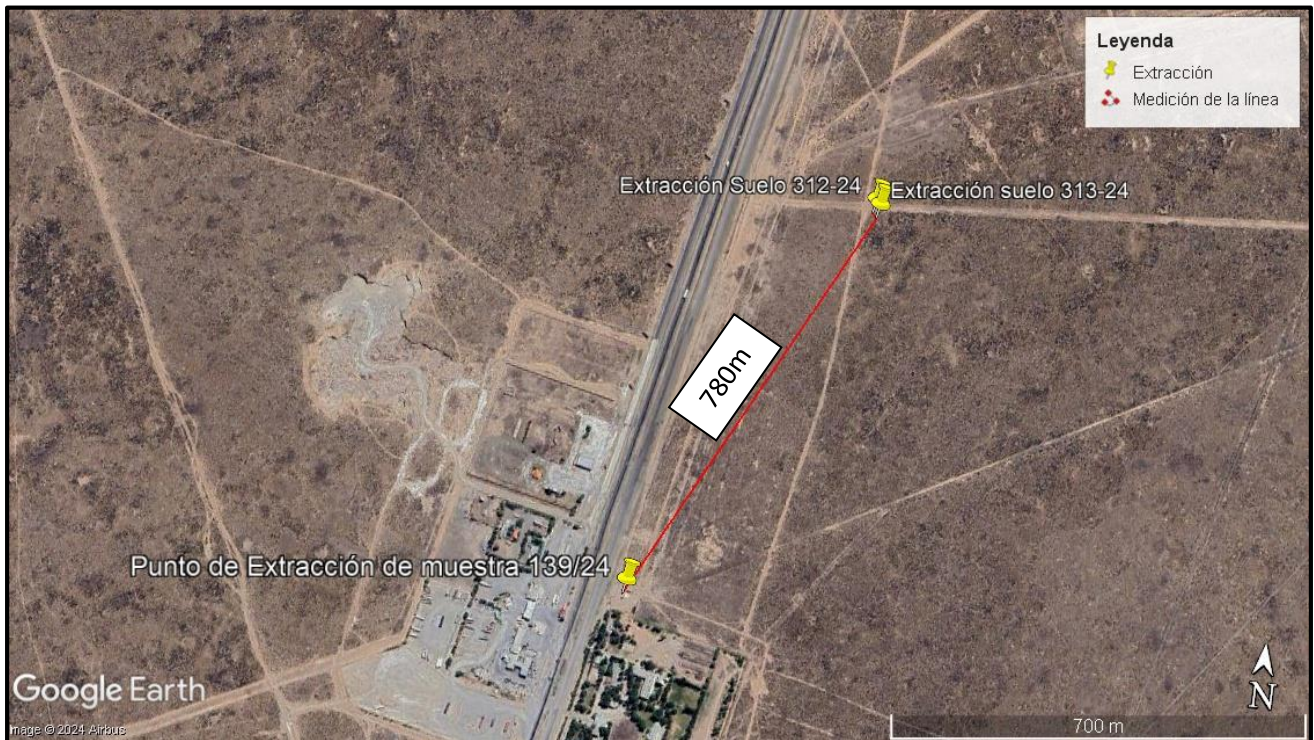


Imagen 51: Distancia entre puntos de extracción de muestras (Fuente: Google Earth).



Imagen 52: Distancia entre muestras 312-24 y 313-24 (Fuente: Google Earth).

Se tiene que para el análisis de las densidades de los suelos son necesarios los siguientes datos:

- 1- Densidad del arena utilizada para determinación de la densidad de suelos:

$$\gamma_{arena} = 1531 \frac{kg}{m^3} = 1,531 \frac{gr}{cm^3}$$

- 2- Constante del cono: es el peso de arena que corresponde al volumen inferior del cono.

$$P_{cono} = 1244,7 \text{ gr}$$



Imagen 53: Muestras de suelo extraídas para determinación de densidad en campo (Der. Suelo 313-24 Izq. Suelo 312-24).

SUELO 312-24:

- $P_{sh312-24} = 2544,5gr$ Peso suelo húmedo.
- $P_{ss312-24} = 2186,8gr$ Peso suelo seco.
- $P_{a.sobrante} = 2244,6gr$ Peso de arena sobrante.

Se calcula el peso de la arena que ingreso al hoyo.

$$P_{a.hoyo} = 6000gr - P_{a.sobrante} - P_{cono}$$

$$P_{a.hoyo.312-24} = 6000gr - 2244,6gr - 1244,7 \text{ gr} = 2510,7gr$$

El volumen del hoyo se calcula utilizando la densidad de la arena.

$$V_{hoyo} = \frac{P_{a.hoyo}}{\gamma_{arena}}$$

$$V_{hoyo.312-24} = \frac{2510,7gr}{1,531 \frac{gr}{cm^3}} = 1640 \text{ cm}^3$$

Con el volumen se calcula la densidad natural del suelo y la densidad del mismo en estado seco.

$$D_{sh} = \frac{P_{sh}}{V_{hoyo}}$$



$$D_{sh.312-24} = \frac{2544,5gr}{1640 \text{ cm}^3} = 1,551 \frac{gr}{\text{cm}^3}$$

$$D_{ss} = \frac{P_{ss}}{V_{hoyo}}$$

$$D_{ss.312-24} = \frac{2186,8gr}{1640 \text{ cm}^3} = 1,333 \frac{gr}{\text{cm}^3}$$

También se obtiene la humedad del suelo en estado natural.

$$H[\%] = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100 = \frac{2544,5gr - 2186,8gr}{2186,8gr} * 100 = 16,4\%$$

SUELO 313-24:

$P_{sh312-24} = 2413,8gr$	Peso suelo húmedo.
$P_{ss312-24} = 2134,4gr$	Peso suelo seco.
$P_{a.sobrante} = 2382,4gr$	Peso de arena sobrante.

Se calcula el peso de la arena que ingreso al hoyo.

$$P_{a.hoyo} = 6000gr - P_{a.sobrante} - P_{cono}$$

$$P_{a.hoyo.312-24} = 6000gr - 2382,4gr - 1244,7 \text{ gr} = 2372,9gr$$

El volumen del hoyo se calcula utilizando la densidad de la arena.

$$V_{hoyo} = \frac{P_{a.hoyo}}{\gamma_{arena}}$$

$$V_{hoyo} = \frac{2372,9gr}{1,531 \frac{gr}{\text{cm}^3}} = 1550 \text{ cm}^3$$

Con el volumen se calcula la densidad natural del suelo y la densidad del mismo en estado seco.

$$D_{sh.313-24} = \frac{2413,8gr}{1550 \text{ cm}^3} = 1,557 \frac{gr}{\text{cm}^3}$$

$$D_{ss.313-24} = \frac{2134,4gr}{1550 \text{ cm}^3} = 1,377 \frac{gr}{\text{cm}^3}$$

También se obtiene la humedad del suelo en estado natural.

$$H[\%] = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100 = \frac{2413,8gr - 2134,4gr}{2134,4gr} * 100 = 13,1\%$$

Se obtiene el promedio de estos valores:

$$D_{sh.prom} = \frac{D_{sh.312-24} + D_{sh.313-24}}{2} = \frac{1,551 \text{ gr/cm}^3 + 1,557 \text{ gr/cm}^3}{2} = 1,554 \frac{gr}{\text{cm}^3}$$

$$D_{ss.prom} = \frac{D_{ss.312-24} + D_{ss.313-24}}{2} = \frac{1,333 \text{ gr/cm}^3 + 1,377 \text{ gr/cm}^3}{2} = 1,355 \frac{gr}{\text{cm}^3}$$

$$H_{prom} = \frac{H_{312-24} + H_{313-24}}{2} = \frac{16,4\% + 13,1\%}{2} = 14,75\%$$

ENSAYO DE PENETRÓMETRO DINAMICO DE CONO – DCP

Este ensayo corresponde a la norma ASTM D6951-03 para el uso del penetrómetro dinámico de cono que tiene como finalidad la obtención indirecta de valores de resistencia de suelos inalterados y/o compactados. El ensayo consiste en la penetración de una varilla con punta cónica mediante el impacto de una masa de peso conocido, penetración medida con una regla comparadora. Obtenidos los datos de penetración e impactos necesarios para lograr esta se obtiene la razón de penetración la cual se puede relacionar con la capacidad de soporte estimada por el ensayo de CBR (Valor Soporte).

Elementos a utilizar:

- Penetrómetro Dinámico de Cono:
 - a) Varilla de penetración.
 - b) Varilla guía para masa.
 - c) Punta Cono recambiable.
 - d) Ensamble de varillas con dispositivo deslizante.
 - e) Masa de 8kg.
 - f) Masa de 4,6kg (10,1 lb).
 - g) Reten superior con empuñadura.
 - h) Base para regla comparadora metálica.
 - i) Regla metálica.

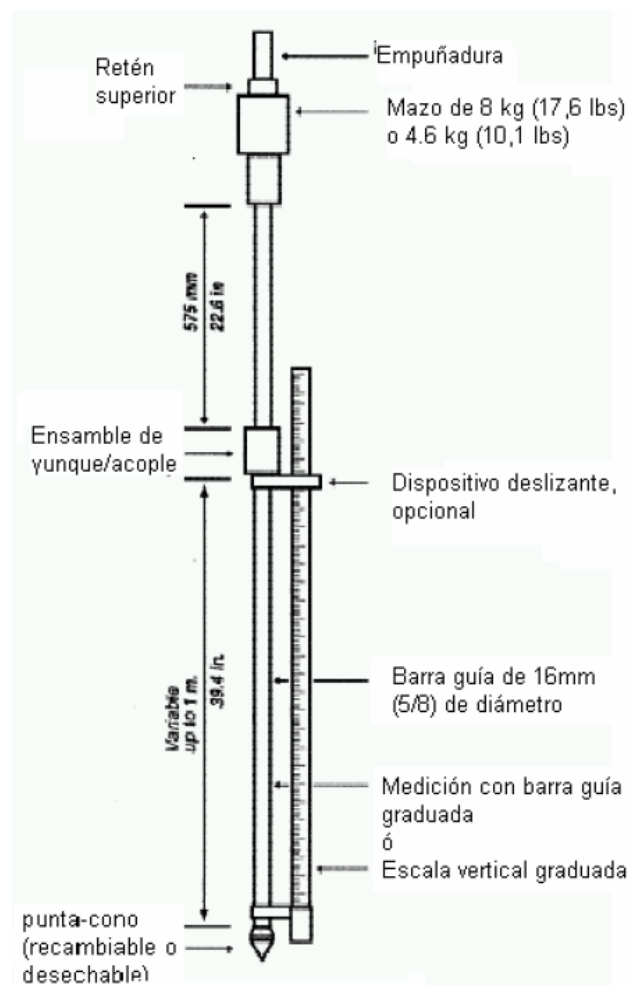


Fig.1: Esquema del DCP

Imagen 54: Esquema del DCP (Fuente: Norma ASTM D6951-03).

- Elementos utilizados para el ensayo de Valor soporte en probetas no saturadas.

Procedimiento:

- 1- Se arma la herramienta DCP.
- 2- El operador levanta el mazo hasta la empuñadura sin que golpee esta y se suelta.



Imagen 55: Operación del DCP Izq. Elevación de la masa Der. Caída de la masa (Fuente: Elaboración propia).

- 3- Se mide la penetración total alcanzada para un determinado número de golpes y se anota la razón de penetración en mm/golpe.
- 4- Se relaciona la razón de penetración con el valor CBR mediante los valores tabulados en la norma, aunque también se pueden hacer ensayos de laboratorio para hacer una correlación específica para el suelo analizado.

Resultados:

Se realizaron 6 ensayos de DCP alrededor de cada sitio de obtención de muestra de los suelos, 3 fueron realizados con masa de 8kg y los 3 restantes se realizaron con masa de 4,6 kg.

El sitio de extracción de la muestra 312-24 se indica como “PUESTO 1” y los puntos de ensayo DCP se indican como A, B y C. Para cada uno de estos se realiza el ensayo con masa de 8kg y masa de 4,6kg con una distancia de alrededor de 30cm de distancia entre estas dos instancias.

El sitio de extracción de la muestra 313-24 se indica como “PUESTO 2” y los puntos de ensayo DCP se indican como A, B y C. Para cada uno de estos se realiza el ensayo con masa de 8kg y masa de 4,6kg con una distancia de alrededor de 30cm de distancia entre estas dos instancias.

La norma del ensayo DCP indica que la relación entre el índice DCP calculado y el valor CBR está dada por la siguiente expresión:



$$CBR[\%] = \frac{292}{DCP^{1,12}}$$

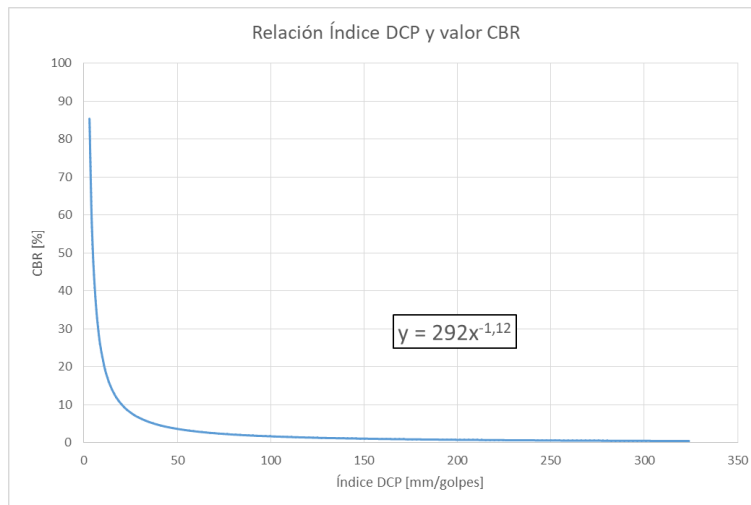


Imagen 56: Relación CBR e índice DCP (Fuente: Elaboración propia).

Esto se aplica a los resultados obtenidos de campo.

RESULTADOS ENSAYO DCP EN CAMPO

Puesto 1A:

Puesto:	1A	8 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	7,6	11,80	15,10	23,10	34,40	43,00	cm
Penetración por etapa		42,00	33,00	80,00	113,00	86,00	mm
Penetración Acum.	0	42,00	75,00	155,00	268,00	354,00	mm
Penetración/golpes		42,00	33,00	26,67	22,60	17,20	mm/golpes
CBR		4,4	5,8	7,4	8,9	12,1	%

Puesto:	1A	4,6 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	4	7,70	10,30	15,90	22,40	27,20	cm
Penetración por etapa		37,00	26,00	56,00	65,00	48,00	mm
Penetración Acum.	0	37,00	63,00	119,00	184,00	232,00	mm
Penetración/golpes		37,00	26,00	18,67	13,00	9,60	mm/golpes
CBR		5,1	7,6	11,0	16,5	23,2	%

Tabla 29: Resultados Ensayo DCP para el puesto 1A (Fuente: Elaboración propia).

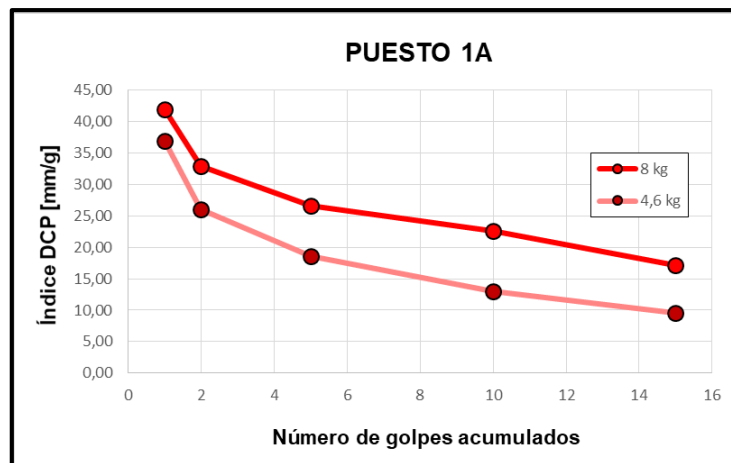


Imagen 57: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 1A (Fuente: Elaboración Propia).

Se observa que para la misma cantidad de golpes se obtienen diferentes números de índice DCP, esto se debe a la diferencia de peso de las masas, por esto no es posible utilizar la misma expresión de relación índice DCP con valor CBR. Se debería realizar ensayos para calibrar esta relación para la masa de 4,6 kg.

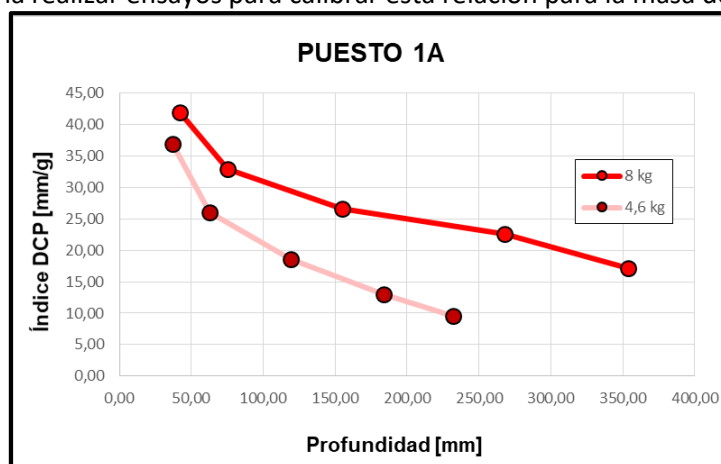


Imagen 58: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 1A (Fuente: Elaboración propia).

De este gráfico se observa como el índice DCP se reduce a más profundidad, que al analizar los valores CBR obtenidos por la expresión de la norma, se tiene que a mayor profundidad se tiene una mayor resistencia del suelo. Siendo que se trata del mismo material, este cambio de resistencias se debe a la compactación natural del material la cual es mayor al aumentar la profundidad.

Puesto 1B:

Puesto:	1B	8 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	6,3	10,60	12,90	19,10	26,80	33,80	cm
Penetración por etapa		43,00	23,00	62,00	77,00	70,00	mm
Penetración Acum.	0	43,00	66,00	128,00	205,00	275,00	mm
Penetración/golpes		43,00	23,00	20,67	15,40	14,00	mm/golpes
CBR		4,3	8,7	9,8	13,7	15,2	%

Puesto:	1B	4,6 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	6,1	8,80	10,50	14,40	19,10	23,50	cm
Penetración por etapa		27,00	17,00	39,00	47,00	44,00	mm
Penetración Acum.	0	27,00	44,00	83,00	130,00	174,00	mm
Penetración/golpes		27,00	17,00	13,00	9,40	8,80	mm/golpes

Tabla 30: Resultados Ensayo DCP para el puesto 1B (Fuente: Elaboración propia).

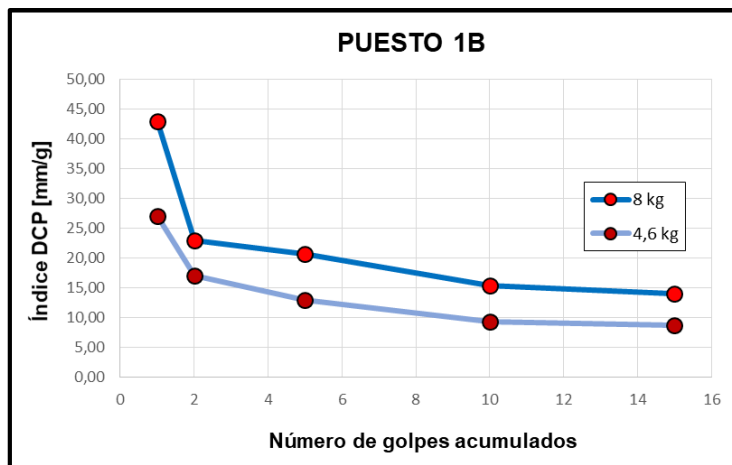


Imagen 59: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 1B (Fuente: Elaboración Propia).

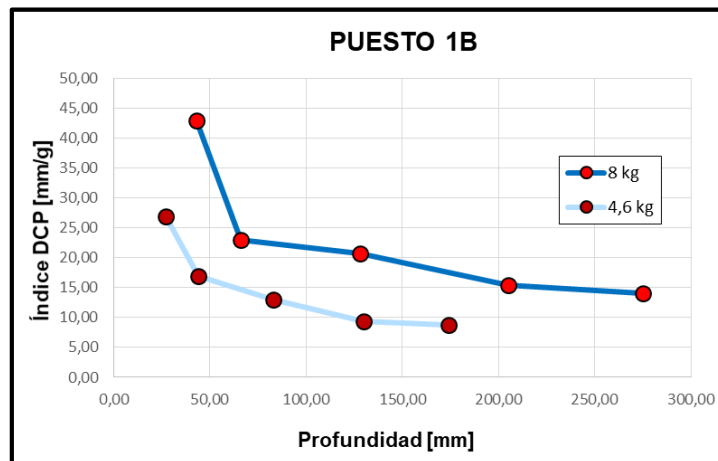


Imagen 60: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 1B (Fuente: Elaboración propia).



Puesto 1C:

Puesto:	1C	8 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	7,9	13,20	16,60	23,30	33,20	41,70	cm
Penetración por etapa		53,00	34,00	67,00	99,00	85,00	mm
Penetración Acum.	0	53,00	87,00	154,00	253,00	338,00	mm
Penetración/golpes		53,00	34,00	22,33	19,80	17,00	mm/golpes
CBR		3,4	5,6	9,0	10,3	12,2	%

Puesto:	1C	4,6 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	6,2	10,30	12,40	16,70	22,60	28,20	cm
Penetración por etapa		41,00	21,00	43,00	59,00	56,00	mm
Penetración Acum.	0	41,00	62,00	105,00	164,00	220,00	mm
Penetración/golpes		41,00	21,00	14,33	11,80	11,20	mm/golpes

Tabla 31: Resultados Ensayo DCP para el puesto 1C (Fuente: Elaboración propia).

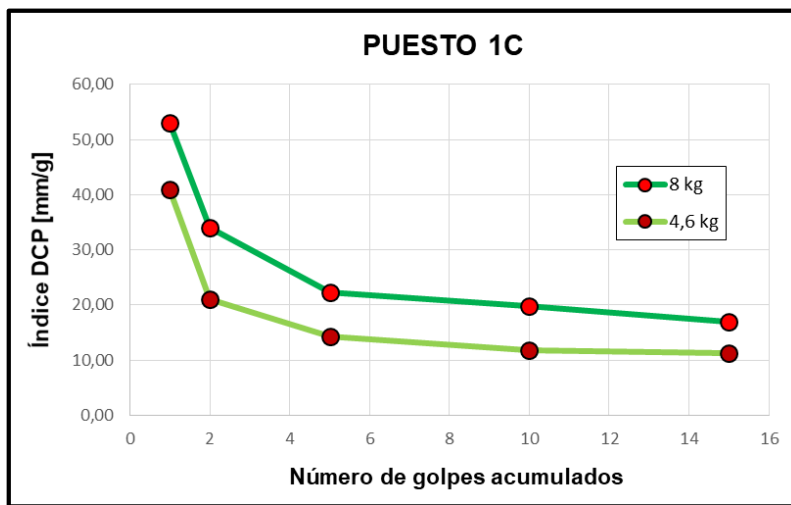


Imagen 61: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 1C (Fuente: Elaboración Propia).

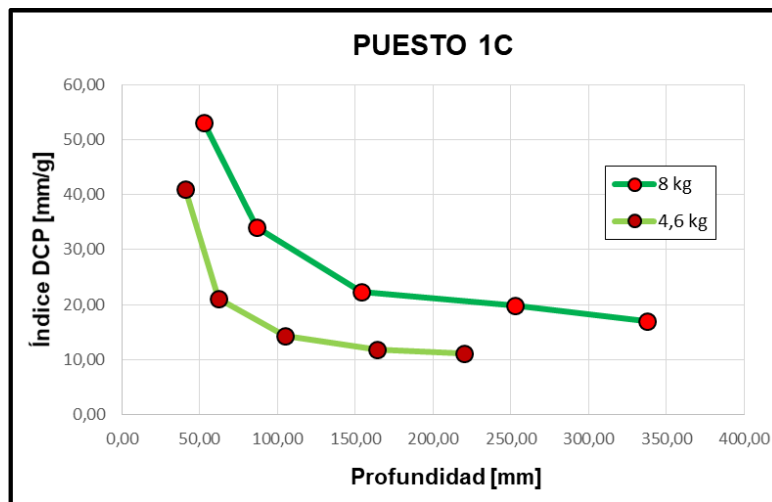


Imagen 62: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 1C (Fuente: Elaboración propia).



Puesto 2A:

Puesto:	2A	8 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	5	6,10	7,00	9,20	18,40	30,00	cm
Penetración por etapa		11,00	9,00	22,00	92,00	116,00	mm
Penetración Acum.	0	11,00	20,00	42,00	134,00	250,00	mm
Penetración/golpes		11,00	9,00	7,33	18,40	23,20	mm/golpes
CBR		19,9	24,9	31,4	11,2	8,6	%

Puesto:	2A	4,6 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	5,4	8,00	9,50	13,00	18,10	22,00	cm
Penetración por etapa		26,00	15,00	35,00	51,00	39,00	mm
Penetración Acum.	0	26,00	41,00	76,00	127,00	166,00	mm
Penetración/golpes		26,00	15,00	11,67	10,20	7,80	mm/golpes

Tabla 32: Resultados Ensayo DCP para el puesto 2A (Fuente: Elaboración propia).

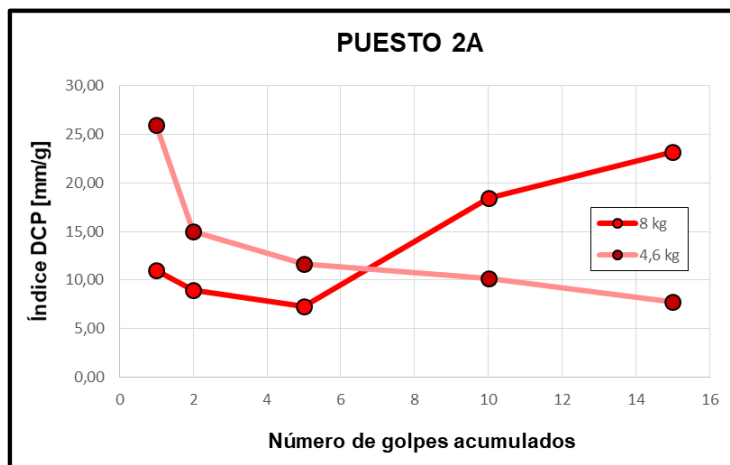


Imagen 63: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 2A (Fuente: Elaboración Propia).

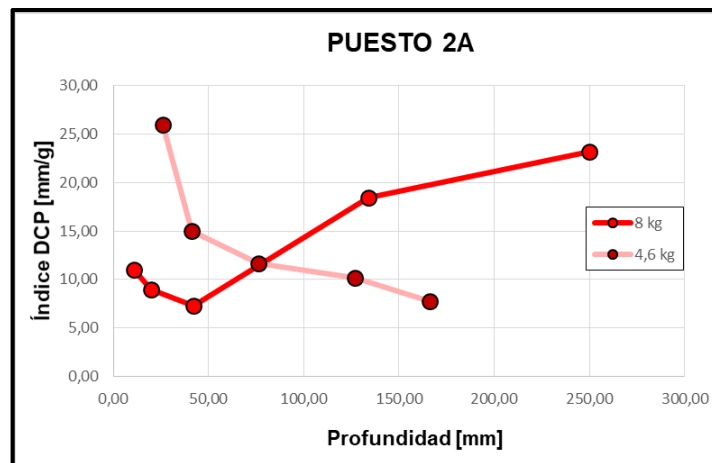


Imagen 64: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 2A (Fuente: Elaboración propia).

El comportamiento en este suelo para el ensayo DCP con masa de 8kg difiere con lo observado en el resto de los puestos. En los primeros centímetros de penetración se tiene un pequeño índice DCP lo que indica una alta resistencia del suelo, a partir de los 75mm de profundidad los valores de este índice aumentan hasta valores similares a los observados en el resto de los puestos para dichas profundidades. Dado que no se conoce la estructura de suelo en el campo y que en este pueden encontrarse granos de grava dispersos, se llega a la conclusión que la herramienta DCP impacto contra una roca, aumentando la resistencia registrada, luego esta se desplazó permitiendo penetrar nuevamente en el suelo.



Puesto 2B:

Puesto:	2B	8 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	7,5	12,00	15,10	21,20	29,70	38,20	cm
Penetración por etapa		45,00	31,00	61,00	85,00	85,00	mm
Penetración Acum.	0	45,00	76,00	137,00	222,00	307,00	mm
Penetración/golpes		45,00	31,00	20,33	17,00	17,00	mm/golpes
CBR		4,1	6,2	10,0	12,2	12,2	%

Puesto:	2B	4,6 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	5,6	8,20	10,30	14,60	20,30	25,00	cm
Penetración por etapa		26,00	21,00	43,00	57,00	47,00	mm
Penetración Acum.	0	26,00	47,00	90,00	147,00	194,00	mm
Penetración/golpes		26,00	21,00	14,33	11,40	9,40	mm/golpes

Tabla 33: Resultados Ensayo DCP para el puesto 2B (Fuente: Elaboración propia).

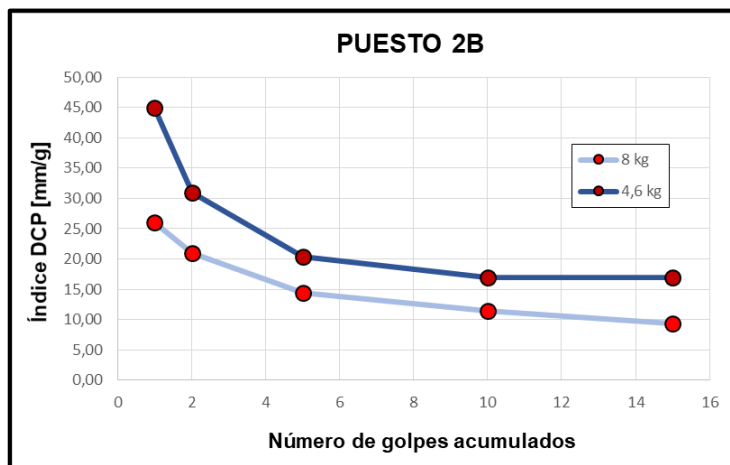


Imagen 65: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 2B (Fuente: Elaboración Propia).

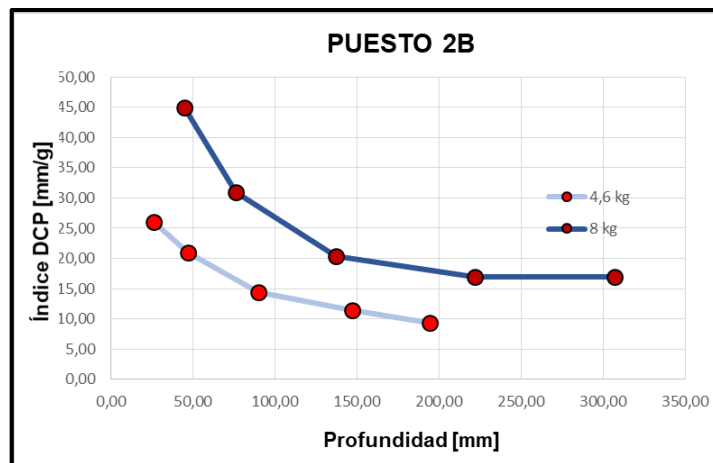


Imagen 66: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 2B (Fuente: Elaboración propia).

Puesto 2C:

Puesto:	2C	8 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	8	11,30	13,10	18,20	25,80	33,60	cm
Penetración por etapa		33,00	18,00	51,00	76,00	78,00	mm
Penetración Acum.	0	33,00	51,00	102,00	178,00	256,00	mm
Penetración/golpes		33,00	9,00	10,20	7,60	5,20	mm/golpes
CBR		5,8	24,9	21,7	30,1	46,1	%

Puesto:	2C	4,6 kg					
Golpes	0	1	1	3	5	5	
Acumulados	0	1	2	5	10	15	
Lecturas	5,5	8,20	9,50	12,60	18,40	23,20	cm
Penetración por etapa		27,00	13,00	31,00	58,00	48,00	mm
Penetración Acum.	0	27,00	40,00	71,00	129,00	177,00	mm
Penetración/golpes		27,00	13,00	10,33	11,60	9,60	mm/golpes

Tabla 34: Resultados Ensayo DCP para el puesto 2C (Fuente: Elaboración propia).

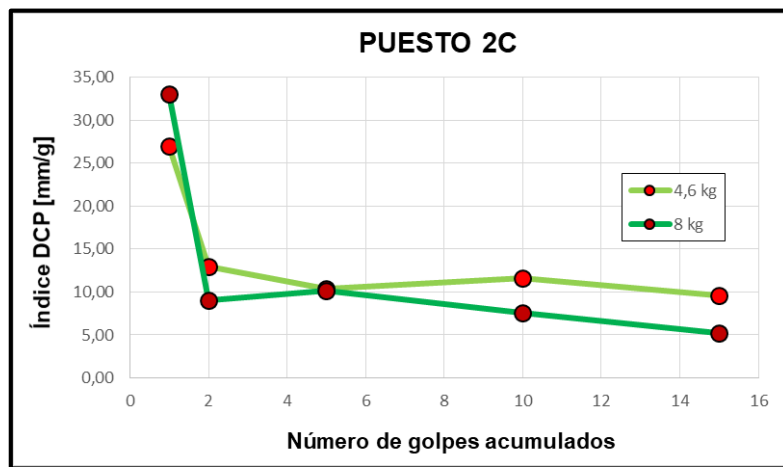


Imagen 67: Relación Golpes de masa y el índice DCP para el puesto 2C (Fuente: Elaboración Propia).

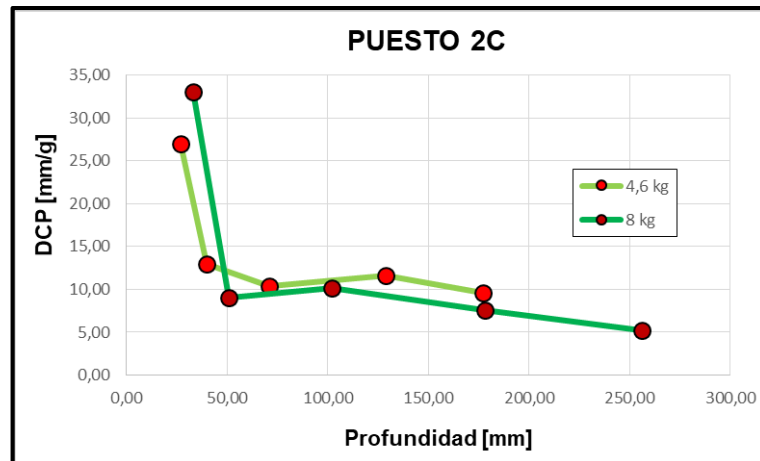


Imagen 68: Evolución del índice DCP con la profundidad de penetración. Puesto 2C (Fuente: Elaboración propia).

En este puesto se observan anomalías respecto al resto de los ensayos. En primer lugar, se tiene un gran salto en los valores de índice DCP para los primeros 50mm de profundidad. También se observa que el suelo ensayado con la masa de 8kg es más resistente que el suelo ensayado con la masa de 4,6 kg, esto para un mismo suelo no sería posible dado que a mayor peso de la masa, se aplica una mayor energía por lo que la penetración debería ser mayor, esto no sucede en este caso.



Estas anomalías indican que el suelo ensayado en este puesto difiere en su estructura al ensayado en el resto de los puestos, también puede deberse a presencia de rocas en el punto de ensayo con masa de 8kg. Por esto se considera que el ensayo falló.

Por estas cosas se concluye respecto al ensayo que de este se obtiene resultados aceptables siempre y cuando el suelo esté constituido mayoritariamente por partículas finas ya que la presencia de rocas genera la obtención de resistencias mayores a las que tiene el suelo.

CORRELACIÓN DE DENSIDADES – VALOR SOPORTE – ÍNDICE DCP

Para tener una correlación entre índice DCP y el valor CBR (Valor Soporte) se realizaron ensayos de Valor Soporte de probetas no saturadas con densidades controladas. Este análisis permite obtener valores CBR para los suelos 139-24, 312-24 y 313-24 correspondientes a los índices DCP obtenidos para estos suelos.

Se prepararon 4 moldes con las siguientes características:

Muestra	N° Golpes	P Pison	Altura	N° Capas	Vol Molde	E	Energía Esp
		kg	cm		cm ³	kg.cm	kg.cm/cm ³
M1	56	4,53	45,7	5	2086	57965,9	27,8
M2	25	4,53	45,7	5	2086	25877,6	12,4
M3	12	4,53	45,7	5	2086	12421,3	6,0
M4	16	2,5	30,5	5	2086	6100,0	2,9

Tabla 35: Energía de compactación para ensayos CBR-DCP (Fuente: Elaboración propia).

Se utilizará suelo 139-24 con una humedad de H=18%.

Molde	Golpes	P. pisón	P.molde	PM+Suelo	P.suelo	V.molde	D.sh	H	GCR	D.ss
		kg	gr	gr	gr	cm ³	g/cm ³	%	%	g/cm ³
1	56	4,53	6500,00	10700,00	4200,00	2086,00	2,013	18,00%	100,0	1,71
2	25	4,53	7230,00	11170,00	3940,00	2086,00	1,889	18,00%	93,8	1,60
3	12	4,53	6990,00	10635,00	3645,00	2086,00	1,747	18,00%	86,8	1,48
4	16	2,50	6860,00	10340,00	3480,00	2086,00	1,668	18,00%	82,9	1,41

Tabla 36: Características de las probetas realizadas para ensayos CBR-DCP (Fuente: Elaboración propia).

El valor GCR (Grado de Compactación Relativo), es el porcentaje de relación entre la densidad de suelo húmedo de las probetas y la densidad del suelo húmedo de la probeta 1.

Luego se realiza el ensayo de penetración sobre las probetas obteniendo los siguientes resultados:



Aro (Kg)	Cte	Sobrec. Hinch (lb)	Sobrec. Penetración (lb)	Area Piston Penetración			
3000	7,955	10	10	19,35	cm2		
5000	16,387						
Molde N°	Penetración (mm)				VS		
	Coef						
1	Lectura del dial (div)	16	83	102	126	143	164
Aro:	Lectura Corregida (div)	16	83	102	126	143	164
5000kg	Carga total aplicada (Kg)	262,19	1360,12	1671,47	2064,76	2343,34	2687,47
	Presión aplicada (Kg/cm2)	13,55	70,29	86,38	106,71	121,10	138,89
	Valor Soporte		114,93		101,62	91,05	86,27
2	Lectura del dial (div)	17	34	49	58	69	82
Aro:	Lectura Corregida (div)	17	34	49	58	69	82
5000kg	Carga total aplicada (Kg)	278,58	557,16	802,96	950,45	1130,70	1343,73
	Presión aplicada (Kg/cm2)	14,40	28,79	41,50	49,12	58,43	69,44
	Valor Soporte		48,39		46,78	43,94	43,13
3	Lectura del dial (div)	35	61	77	84	100	110
Aro:	Lectura Corregida (div)	35	61	77	84	100	110
3000kg	Carga total aplicada (Kg)	278,43	485,26	612,54	668,22	795,50	875,05
	Presión aplicada (Kg/cm2)	14,39	25,08	31,66	34,53	41,11	45,22
	Valor Soporte		39,94		32,89	30,91	28,09
4	Lectura del dial (div)	13	30	41	48	58	68
Aro:	Lectura Corregida (div)	13	30	41	48	58	68
3000kg	Carga total aplicada (Kg)	103,42	238,65	326,16	381,84	461,39	540,94
	Presión aplicada (Kg/cm2)	5,34	12,33	16,86	19,73	23,84	27,96
	Valor Soporte		19,97		18,79	17,93	17,36

Tabla 37: Resultados de ensayo de Valor Soporte para análisis de ensayo DCP (Fuente: Elaboración propia).



Se obtienen el promedio de valores de CBR de los ensayos de campo para los golpes acumulados, pero se exceptúan los valores de los puestos 2A y 2C debido a los errores que poseen los resultados de dichos ensayos.

Golpes acc.	1	2	5	10	15
CBR 1A	4,4	5,8	7,4	8,9	12,1
CBR 1B	4,3	8,7	9,8	13,7	15,2
CBR 1C	3,4	5,6	9,0	10,3	12,2
CBR 2B	4,1	6,2	10,0	12,2	12,2
Promedio	4,0	7,0	9,0	11,0	13,0

Tabla 38: Resistencias promedio de suelos 312-24 y 313-24 en campo (Fuente: Elaboración propia).

Estos valores se relacionan a los obtenidos en el ensayo de valor soporte hecho previamente y a las densidades obtenidas para los suelos 312-24 y 313-24.

Molde	VS - CBR	D.sh	D.ss
	%	g/cm3	g/cm3
1	115	2,013	1,706
2	48	1,889	1,601
3	40	1,747	1,481
4	20	1,668	1,414
Suelo Nat 1	4	1,554	1,355
Suelo Nat 2	7	1,554	1,355
Suelo Nat 3	9	1,554	1,355
Suelo Nat 4	11	1,554	1,355
Suelo Nat 5	13	1,554	1,355

Tabla 39: Valores CBR y densidades para los suelos ensayados (Fuente: Elaboración propia).

Se grafican los valores:

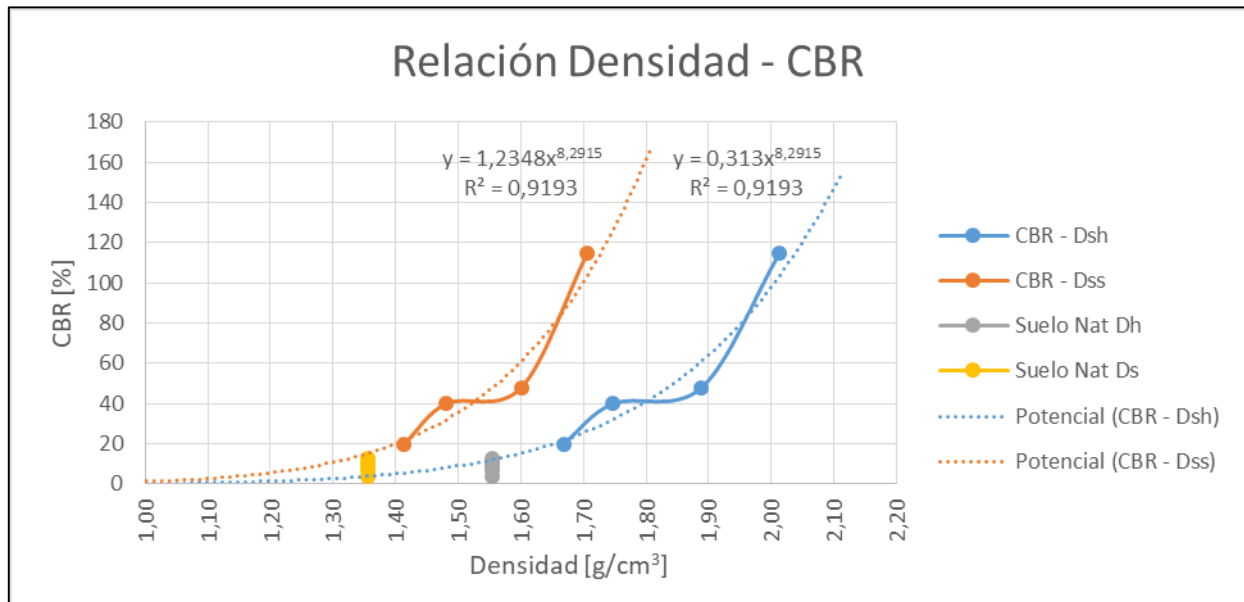


Imagen 69: Gráfico de relación de densidades del suelo y valores obtenidos de CBR (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que los puntos correspondientes a los moldes 2 y 3 tienen una divergencia respecto de una línea de tendencia potencial lo que genera que la correlación sea de un 91,93%. Si se excluyen los valores del molde 2 se tiene el siguiente gráfico.

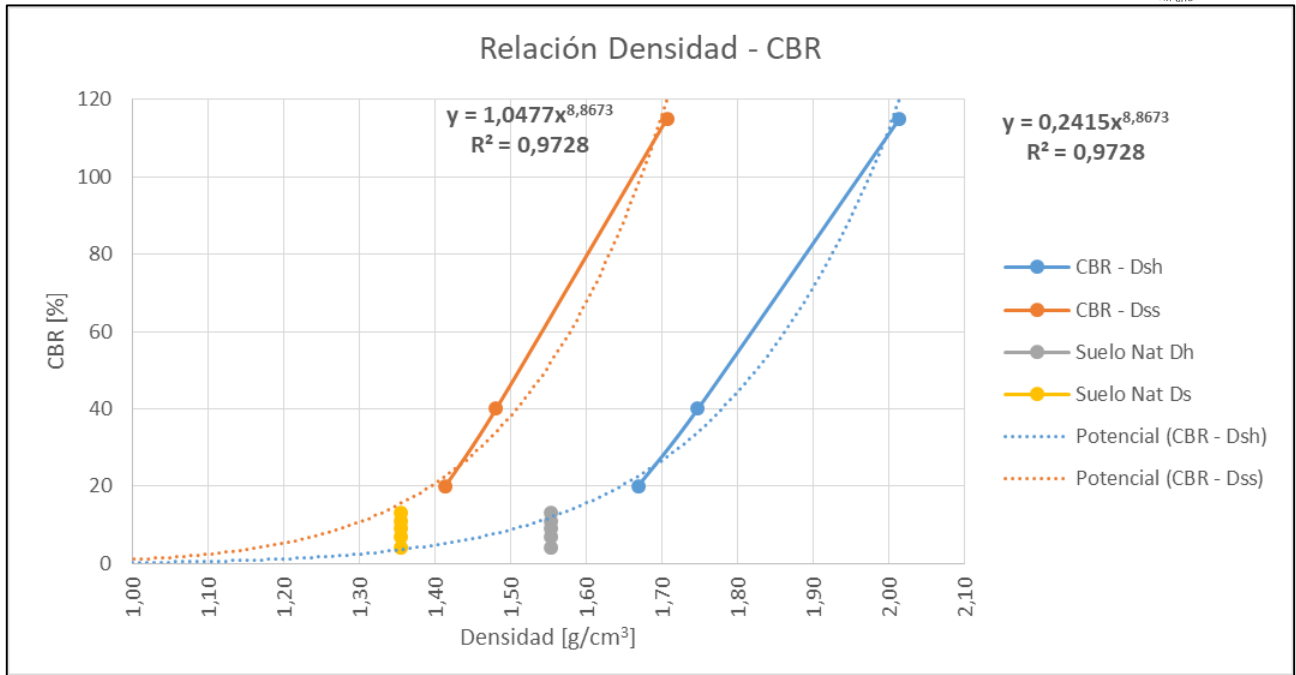


Imagen 70: Relación Densidad - CBR sin los valores del molde 2.

Y sin los valores del molde 3:

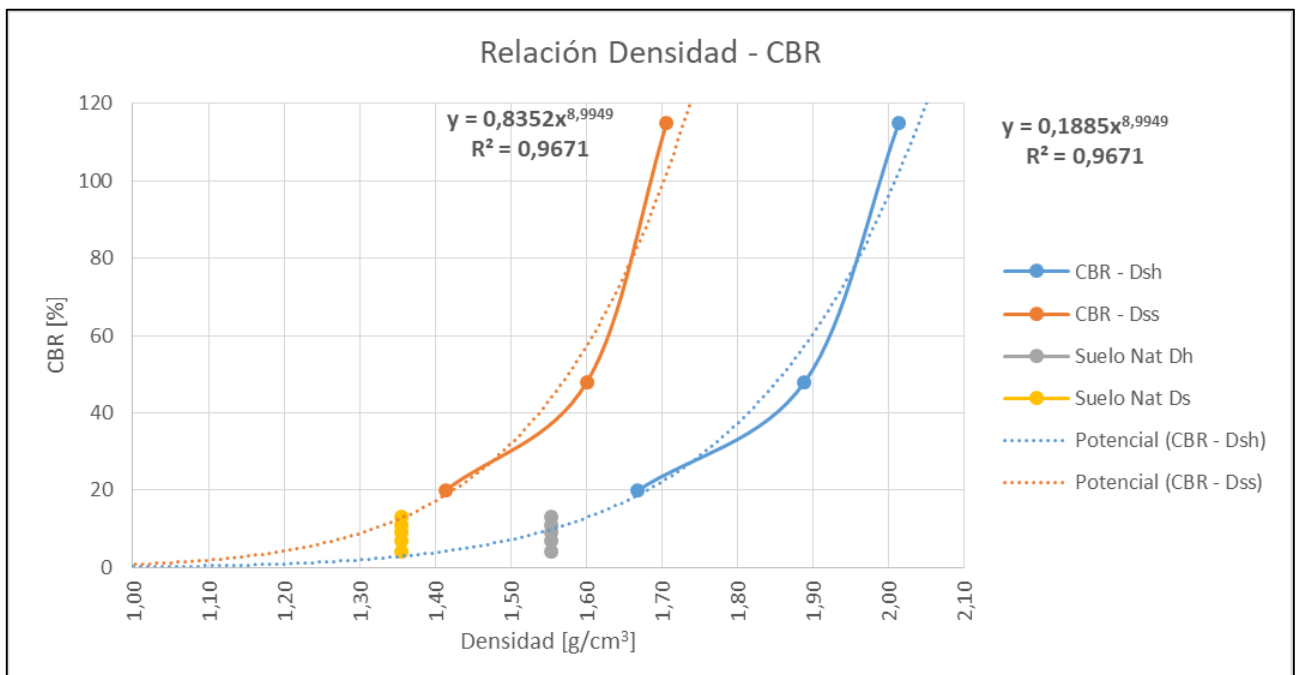


Imagen 71: Relación Densidad - CBR sin los valores del molde 3.

Si no se tienen en cuenta los valores del molde N°3 se tiene una correlación mayor que con todos los valores del ensayo y una menor correlación que si no se tiene en cuenta los valores del molde N°2, pero respecto a este último se obtienen un comportamiento más cercano a una relación potencial de los valores de densidad y resistencia CBR.

Observando este último análisis respecto de los valores de suelo natural se tiene lo siguiente:

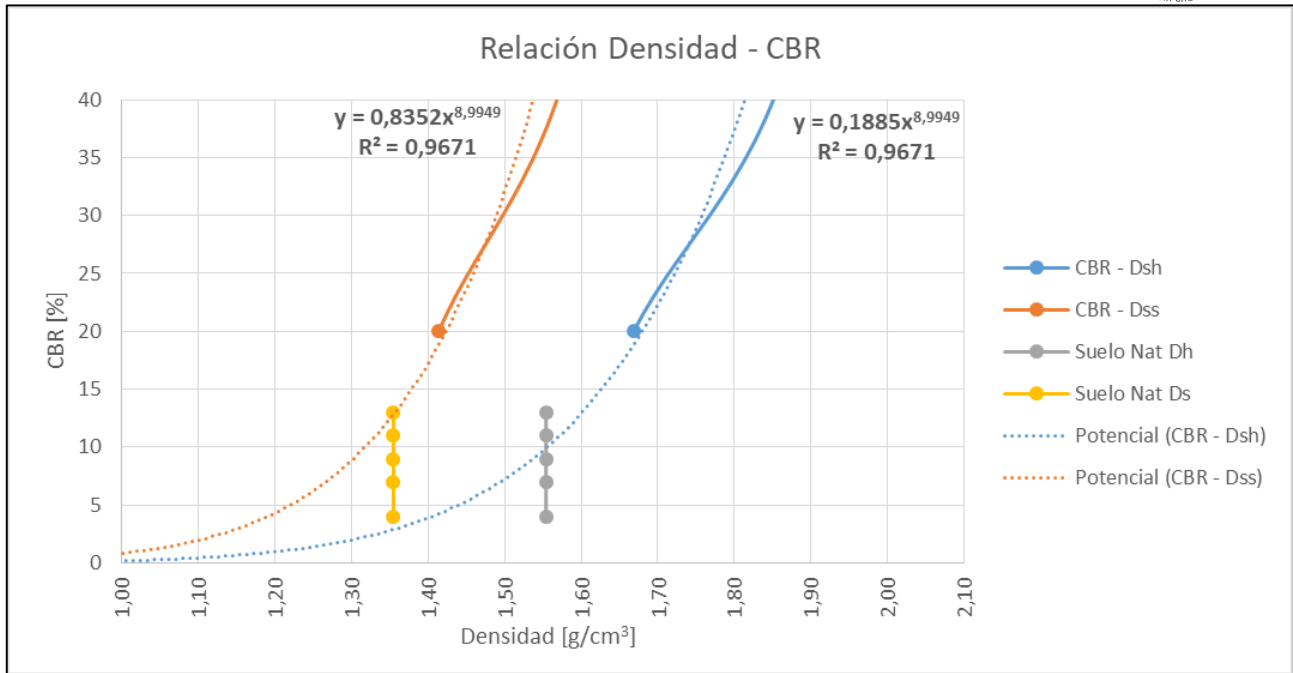


Imagen 72: Relación Densidades - CBR para suelo en estado natural (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que para densidades secas, los valores promedio de CBR para los suelos en estado natural de campo se correlacionan con las líneas de tendencia obtenidas para los ensayos de valor soporte de laboratorio, para los estratos más profundos a los cuales se llegó con 15 golpes utilizando la masa de 8kg. Por lo que se concluye que en suelos similares al suelo 139-24 se debe iniciar el ensayo DSP con masa de 8kg, con al menos 10 golpes.

CORRECCIÓN DE VALORES CRB PARA SUELO 139-24

Para corregir los valores CRB para el suelo analizado se efectúa el ensayo DCP sobre la cara inferior de las probetas ensayadas para valor soporte, de esta manera se obtiene la relación de índice DCP con los valores CRB específicamente para este suelo. Se considera que por las dimensiones de la probeta el ensayo DCP tendrá una penetración menor a la obtenida en el campo.

Molde	1	CRB laboratorio		115	
Golpes	0	1,00	1,00	3,00	
Acumulados	0	1,00	2,00	5,00	
Lecturas (cm)	15,2	16,40	16,90	17,70	
Penetración por etapa	0	12,00	5,00	8,00	mm
Penetración Acum.		12,00	17,00	25,00	mm
Índice DCP total mm/golpe		12,00	5,00	2,67	mm/golpes
CBR - Norma		18,1	48,1	97,3	

Molde	2	CRB laboratorio		48	
Golpes	0	1,00	1,00	3,00	
Acumulados	0	1,00	2,00	5,00	
Lecturas	15,1	16,80	17,40	19,30	mm
Penetración por etapa	0	17,00	6,00	19,00	mm
Penetración Acum.		17,00	23,00	42,00	mm/golpes
Índice DCP total mm/golpe		17,00	6,00	6,33	
CBR - Norma		12,2	39,3	36,9	



Molde	3	CRB laboratorio		40	
Golpes	0	1,00	1,00	3,00	
Acumulados	0	1,00	2,00	5,00	mm
Lecturas	15,4	17,20	18,10	25,00	mm
Penetración por etapa	0	18,00	9,00	69,00	mm/golpes
Penetración Acum.		18,00	27,00	96,00	
Indice DCP total mm/golpe		18,00	9,00	23,00	
CBR - Norma		11,5	24,9	8,7	

Molde	4	CRB laboratorio		20	
Golpes	0	1,00	1,00		
Acumulados	0	1,00	2,00		
Lecturas	15,3	17,20	18,90		
Penetración por etapa	0	19,00	17,00		mm
Penetración Acum.		19,00	36,00		mm
Indice DCP total mm/golpe		19,00	17,00		mm/golpes
CBR - Norma		10,8	12,2		

Tabla 40: Resultados ensayo DCP en las probetas (Fuente: Elaboración propia).

Se relacionan los valores CBR obtenidos en laboratorio con los índices DCP obtenidos para la máxima penetración alcanzada en cada probeta.

CBR Laboratorio	115	48,00	40,00	20,00	%
Índice DCP	2,67	6,33	8,71	17,00	mm/golpes

Tabla 41: Relación CBR obtenido en laboratorio e índice DCP obtenido de probetas (Fuente: Elaboración propia).

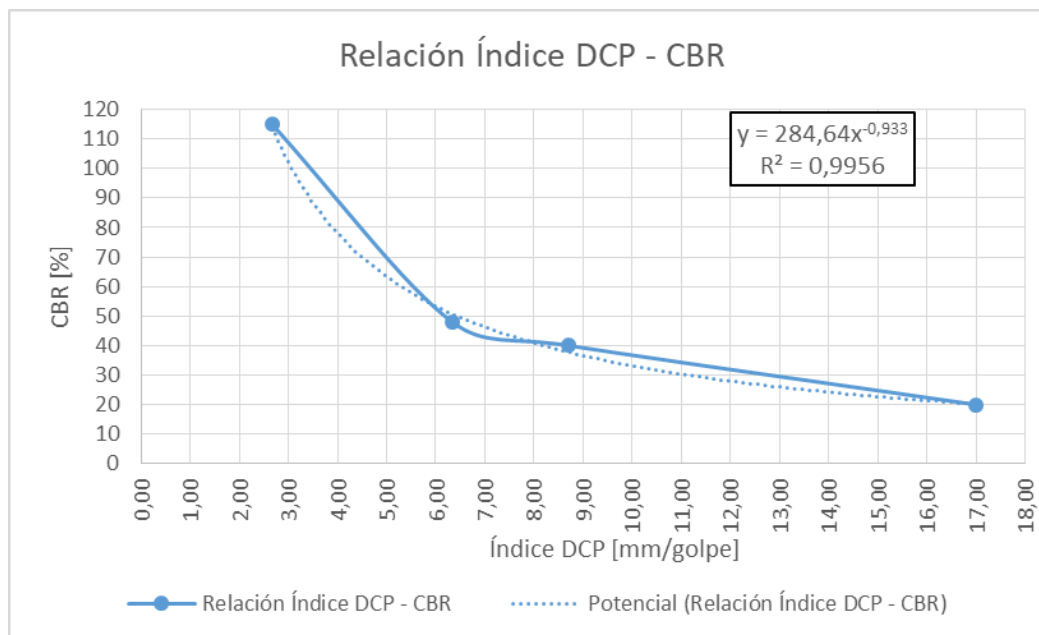


Imagen 73: Relación DCP - CRB para el suelo 139-24 (Fuente: Elaboración propia).

Para estos valores se obtuvo la siguiente expresión:

$$CBR[\%] = \frac{284,64}{DCP^{0,933}}$$

Se tiene una correlación del 99,56% y si se utiliza la función de la línea de tendencia adoptada, los valores de CBR promedio para el suelo natural son los siguientes:



Golpes acc.	1	2	5	10	15
CBR laboratorio 1A	8,7	10,9	13,3	15,5	20,0
CBR norma 1A	4,4	5,8	7,4	8,9	12,1
CBR laboratorio 1B	8,5	15,3	16,9	22,2	24,3
CBR norma 1B	4,3	8,7	9,8	13,7	15,2
CBR laboratorio 1C	7,0	10,6	15,7	17,6	20,2
CBR norma 1C	3,4	5,6	9,0	10,3	12,2
CBR laboratorio 2B	8,2	11,6	17,1	20,2	20,2
CBR norma 2B	4,1	6,2	10,0	12,2	12,2
Promedio laboratorio	8,0	12,0	16,0	19,0	21,0
Promedio norma	4,0	7,0	9,0	11,0	13,0
Diferencia	100%	71%	78%	73%	62%

Tabla 42: Relación de valores promedio CBR entre los obtenidos por norma y los obtenidos por la relación adoptada en laboratorio (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que utilizando la relación CBR – Índice DCP obtenida en laboratorio se tiene una diferencia con respecto a la relación indicada por la norma ASTM.

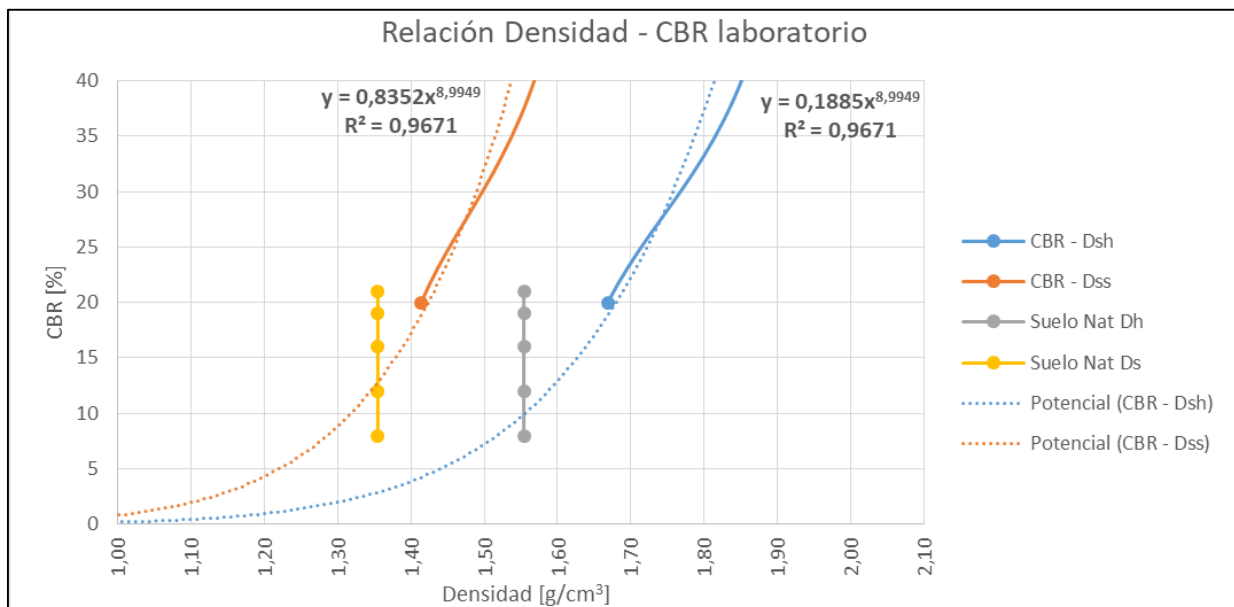


Imagen 74: Relación Densidad - CBR obtenido en laboratorio (Fuente: Elaboración propia)

Graficando la función obtenida junto con la expresada en la norma se tiene el siguiente gráfico:

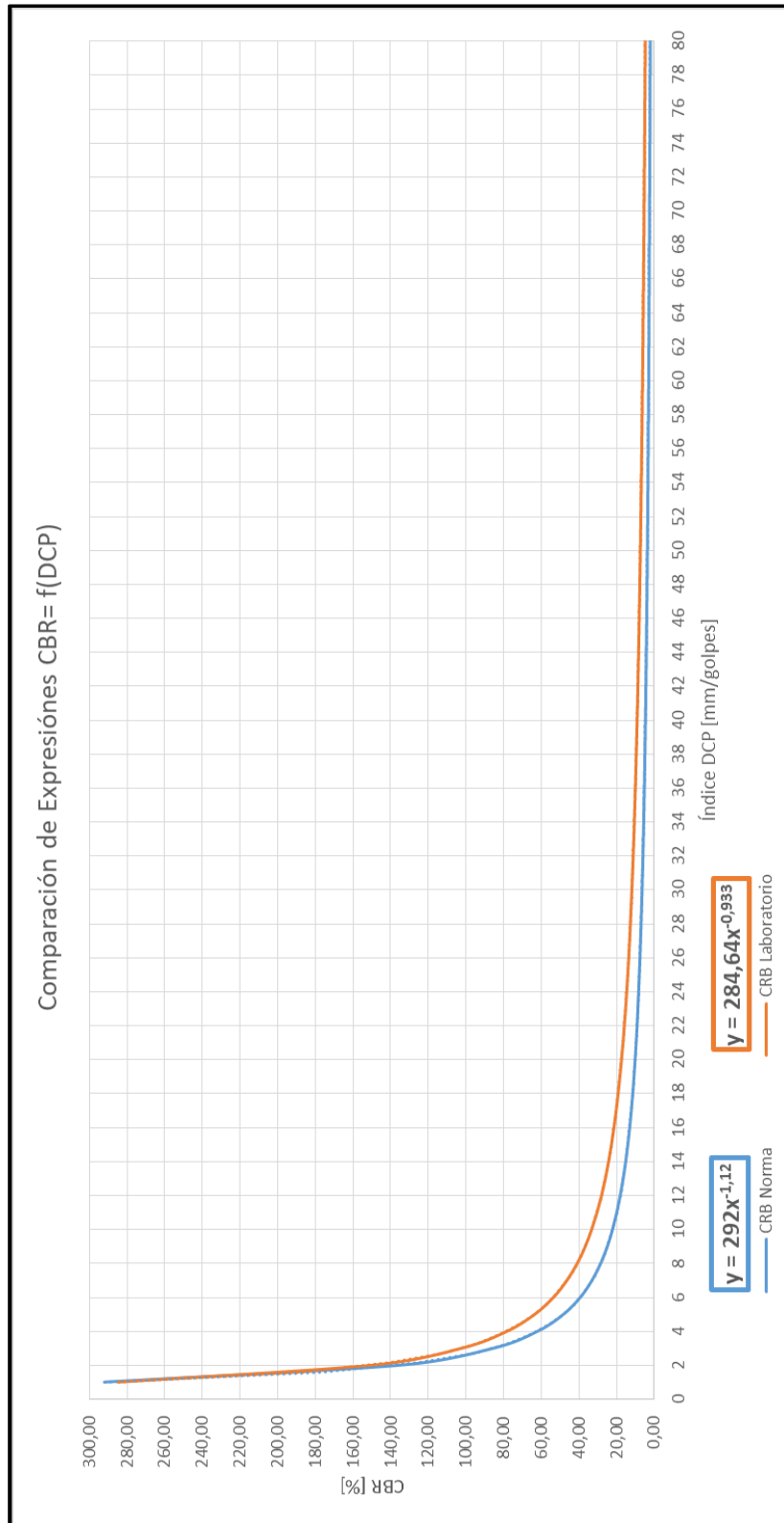


Imagen 75: Comparación de expresión de norma y expresión experimental para la relación CBR=f(DCP) (Fuente Elaboración propia).

Como puede observarse tanto en las expresiones como en la comparativa de la imagen 76, la diferencia real entre estas es mínima, aún más considerando que la expresión experimental de los ensayos sobre el suelo 139-24 se obtiene a partir de 4 probetas. Con lo cual la expresión indicada en la norma es una buena aproximación de los valores de CBR reales.



CONCLUSIONES

- El suelo rojo obtenido en inmediaciones del Valle Inferior del Río Chubut posee las siguientes características físicas:

Característica	Valor	Unidad
Gs	2,71875	gr/cm ³
Límite Líquido	30	%
Límite Plástico	19,5	%
Índice de Plasticidad	10,5	%

Tabla 43: Resumen características físicas (Fuente: Elaboración propia).

- Este suelo se clasifica bajo el sistema de clasificación H.R.B. como A-6 (3) y bajo el sistema de clasificación S.U.C.S. como SC (arena arcillosa).
- La granulometría hecha con hidrómetros indica que este suelo está compuesto en un 48% por partículas menores a 74 micrómetros de las cuales el 67,4% corresponde a limos, el 9,1% corresponde a arcillas y el 23,5% corresponde a coloides.
- Para el ensayo de compactación T99 el suelo posee una densidad de suelo seco máxima de 1608 gr/cm³ para una humedad óptima de 22%. Además, los valores de la curva de compactación para el ensayo T99 se pueden relacionar con la siguiente función:

$$D_{S,T99} = 135.673 * H^3 - 174.945 * H^2 + 45.518 * H - 2.693,8$$
- Para el ensayo de compactación T180 el suelo posee una densidad de suelo seco máxima de 1765 gr/cm³ para una humedad óptima de 17,8%. Además los valores de la curva de compactación para el ensayo T99 se pueden relacionar con la siguiente función:

$$D_{S,T180} = 1.688.929,22 * H^3 - 1.033.696,16 * H^2 + 207.358,34 * H - 11.921,33$$
- Para el suelo compactado en densidades entre 1,277 gr/cm³ y 1,675 gr/cm³ se obtienen valores CBR entre 6 y 61 para suelo no saturado con 16,2% de humedad y valores de CRB entre 1 y 3 para suelo saturado. Con esto se tiene que este suelo tiene una buena capacidad portante mientras que su contenido de humedad se encuentre por debajo del límite plástico, pero esta capacidad se pierde casi en su totalidad cuando el suelo se encuentra saturado.
- El ensayo DCP correspondiente a la norma ASTM D6951-03 es una herramienta para obtener de manera indirecta valores de resistencia de suelos, y la expresión indicada en la norma que relaciona el índice DCP con el valor soporte CBR es una buena aproximación de la capacidad portante del suelo.



VALORACIONES DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Mediante las actividades realizadas en las prácticas profesionales supervisadas realizadas en el Laboratorio de Investigación y Ensayos Viales (LABIEVI) se me dio la oportunidad de poner en práctica conocimientos relacionados a la caracterización de suelos mediante ensayos derivados de normas nacionales e internacionales. Estos ensayos me permitieron conocer el comportamiento del suelo en relación a la presencia de agua en este y cómo evoluciona su resistencia. Con el acompañamiento de los tutores pude comprender más a fondo los conceptos teóricos vistos en las materias de Geología y Geotecnia cursadas en la carrera de Ingeniería Civil.

Mediante las prácticas no solo adquirí los conocimientos para la realización de ensayos, sino que también me permitieron generar criterios técnicos para los trabajos a realizar a futuro.

Durante las prácticas profesionales se me desafió a utilizar los conceptos adquiridos de manera crítica en forma tal de distinguir la veracidad de los resultados obtenidos y la fiabilidad de las técnicas utilizadas.

Lo indicado aquí me lleva a concluir que el contacto con las actividades profesionales durante el transcurso de la carrera es muy importante para un desarrollo completo del alumno previo a la vida profesional.

Por último quiero agradecer al Ingeniero Oscar Moreno, al Ingeniero Alejandro Jones, a mi compañera en la realización de las prácticas Cid Antonela, al personal del LABIEVI y a la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco por el acompañamiento, dedicación y por la oportunidad que se me ha dado tanto en el estudio de la carrera como en la realización de las prácticas.

Raigné Josué Gabriel



BIBLIOGRAFÍA

- ASTM. (2003). ASTM D6951-03. *Método de ensayo estándar para el uso del Penetrómetro Dinámico de Cono en estructuras de pavimentos.*
- ASTM. (2007). ASTM D422- 63. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.* EEUU.
- Bowles, J. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil.* McGraw-Hill.
- Google. (2024). Google Earth.
- IRAM. (1959). IRAM 10504/1959. *Límite y Relación de Contracción.* Argentina.
- Vialidad, Nacional. (s.f.). Normas de Ensayos - Vialidad Nacional. Buenos Aires, Argentina.



ANEXO: TABLA DE CLASIFICACIÓN SUCS

