

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**



### **TESIS**

**INFLUENCIA DEL TERRASIL EN LOS PARÁMETROS DE  
COMPACTACIÓN EN SUELO ARCILLOSO DE BAJA  
PLASTICIDAD DEL SECTOR HUACARIZ, CAJAMARCA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO CIVIL**

### **AUTOR**

Bachiller GARCÍA ROJAS, María Fany

### **ASESOR:**

Dra. Ing. LLIQUE MONDRAGÓN, Rosa

**Cajamarca - Perú**

**2024**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

### - FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: **MARÍA FANY GARCIA ROJAS**  
DNI: 46067309  
Escuela Profesional: **INGENIERÍA CIVIL**
2. Asesor: **DRA. ROSA HAYDEE LLIQUE MONDRAGÓN**  
Facultad: **INGENIERÍA**
3. Grado académico o título profesional  
 Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor
4. Tipo de Investigación:  
 Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:  
INFLUENCIA DEL TERRASIL EN LOS PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN EN SUELO  
ARCILLOSO DE BAJA PLASTICIDAD DEL SECTOR HUACARIZ, CAJAMARCA
6. Fecha de evaluación: 20 DE MARZO DEL 2024
7. Software antiplagio:       TURNITIN       URKUND (ORIGINAL) (\*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 22 %
9. Código Documento: oid:3117:341309389
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:  
 APROBADO     PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 20 DE MARZO DEL 2024

		Firmado digitalmente por: FERNANDEZ LEON Yvonne Katherine FAU 20148258601 soft Motivo: Soy el autor del documento Fecha: 21/03/2024 12:41:57-0500
<p>FIRMA DEL ASESOR</p>	<p>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</p>	
<p>Nombres y Apellidos: <b>ROSA HAYDEE LLIQUE MONDRAGÓN</b></p>		
<p>DNI: 26621287</p>		

## DEDICATORIA

*Este trabajo lo dedico a:*

*Mis padres:*

*Estanislao García Delgado y María Santos Rojas Rimarachín, quienes, gracias a sus buenos consejos, su apoyo incondicional y su espíritu de lucha han forjado en mí una persona con valores y con capacidad de superación, enseñándome que la educación es la mejor herencia que un hijo puede recibir.*

*Mis hermanos:*

*Ángel, Fernando, Sor Mirabel, Gumercinda, Segundo y Paty García Rojas, por su apoyo económico, moral, espiritual en todo el transcurso de mi formación académica y estando conmigo en los momentos más difíciles. Todos llenando de alegría y felicidad nuestro hogar junto a nuestros queridos padres.*

*Mis abuelitos:*

*Magdalena y Máximo; Isabel y Seberina, aunque ahora ya no estén junto a nosotros físicamente, pero ellos siempre confiaron en sus nietos que lograríamos superarnos y terminar una carrera universitaria.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios, Por su amor infinito a toda mi familia, permitiendo gozar de buena salud, ayudándome ante las situaciones difíciles, para lograr así concretizar esta meta profesional.*

*A la Universidad Nacional de Cajamarca, por la formación brindada mediante sus catedráticos en la Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil, fundamentada en la Investigación, la Formación y la Proyección social.*

*A la Ing. Rosa Haydee LLique Mondragón, que tuvo la voluntad e iniciativa de guiarme en esta tesis, aportando con sus sabios conocimientos.*

*A los Docentes, que me impartieron sus conocimientos durante todo el transcurso de mi formación académica, haciendo de mi un profesional con capacidad intelectual, ética y moral.*

*Agradezco de manera especial a mi esposo Hugo Carlos Guillén por su apoyo para culminar esta tesis, quien, junto con mi hijita Milagritos son motivo de superación y felicidad.*

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
CONTENIDO .....	v
INDICE DE TABLAS .....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	12
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Formulación del problema .....	14
1.3 Justificación de la investigación .....	14
1.4 Alcances o delimitación de la investigación.....	15
1.5 Limitaciones .....	15
1.6 Objetivos .....	15
1.7 Hipótesis.....	16
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	17
2.1 Antecedentes teóricos de la investigación.....	17
2.1.1 Internacionales.....	17
2.1.2 Nacionales .....	18
2.1.3 Locales.....	19
2.2 Bases teóricas.....	19
2.2.1 Mecánica de suelos.....	19
2.2.2 Propiedades físico- mecánica de los suelos. ....	22
2.2.3 Plasticidad y consistencia de los suelos.....	27
2.2.4 Clasificación e identificación de suelos .....	32
2.2.5 Compactación .....	36
2.2.6 Estabilización .....	37
2.2.7 Aditivo Terrasil .....	39
2.3 Definición de términos básicos.....	40
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
3.1 Ubicación geográfica.....	42
3.2 Equipos, herramientas, materiales e insumos.....	43

3.2.1	Equipos y herramientas.....	43
3.2.2	Materiales e insumos .....	43
3.3	Metodología y desarrollo de la investigación.....	43
3.4	Población y muestra .....	44
3.4.1	Población .....	44
3.4.2	Muestra .....	44
3.5	Procedimiento de ensayos de laboratorio .....	45
3.5.1	Determinación del contenido de humedad .....	45
3.5.2	Análisis granulométrico método de lavado.....	46
3.5.3	Determinación de límite líquido .....	46
3.5.4	Determinación de límite plástico .....	46
3.5.5	Clasificación de suelos.....	46
3.5.6	Ensayo proctor modificado.....	47
3.5.7	Ensayo de peso unitario.....	47
3.6	Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados .....	48
3.6.1	Propiedades físicas del suelo.....	48
3.6.2	Parámetros de compactación del suelo .....	55
3.6.3	Dosificación de aditivo aplicado al suelo.....	56
3.6.4	Parámetros de compactación del suelo - Terrasil .....	57
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		61
1.1	Análisis de los resultados.....	61
1.2	Discusión de los resultados.....	64
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		67
1.1	Conclusiones.....	67
1.2	Recomendaciones.....	68
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....		69
APÉNDICES .....		73
Apéndice A: Propiedades físicas y clasificación del suelo.....		73
a.	Contenido de humedad .....	73
b.	Peso unitario seco.....	74
c.	Análisis granulométrico de las muestras .....	74
d.	Límites de plasticidad de muestras patrón .....	76
e.	Límites de plasticidad adicionando estabilizante Terrasil.....	80

f. Clasificación del suelo mediante el método SUCS.....	94
g. Clasificación del suelo mediante el método AASHTO.....	96
Apéndice B. Parámetros de compactación de las muestras patrón.....	97
Apéndice C. Dosificación de Terrasil para proctor modificado .....	103
Apéndice D. Parámetros de compactación adicionando Terrasil .....	106
Apéndice E. Dosificación de Terrasil para límites de plasticidad.....	124
Apéndice F. Cálculo del IG según el IP obtenido con el Terrasil. ....	126
ANEXOS.....	127

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Límites de tamaños de suelos separados.....	21
<b>Tabla 2</b>	Juego de tamices según ASTM E11 .....	27
<b>Tabla 3</b>	Rango del número de golpes para límite líquido.....	30
<b>Tabla 4</b>	Rango de los límites de plasticidad según el tipo de suelo .....	32
<b>Tabla 5</b>	Símbolos de grupo según SUCS .....	33
<b>Tabla 6</b>	Tipo de suelo según valor del índice de grupo .....	36
<b>Tabla 7</b>	Datos de ubicación de la extracción de la muestra.....	45
<b>Tabla 8</b>	Denominación de los especímenes de la muestra que se analizaron .....	45
<b>Tabla 9</b>	Contenido de humedad para las muestras de las calicatas.....	48
<b>Tabla 10</b>	Peso unitario seco de las muestras .....	49
<b>Tabla 11</b>	Análisis granulométrico de la muestra C1.....	49
<b>Tabla 12</b>	Análisis granulométrico de la muestra C2.....	50
<b>Tabla 13</b>	Análisis granulométrico de la muestra C3.....	51
<b>Tabla 14</b>	Límites de Atterberg del suelo .....	52
<b>Tabla 15</b>	Límites de Atterberg del suelo adicionando Terrasil .....	53
<b>Tabla 16</b>	Clasificación del suelo mediante AASHTO .....	55
<b>Tabla 17</b>	Clasificación del suelo .....	55
<b>Tabla 18</b>	Parámetros de compactación de muestras patrón.....	56
<b>Tabla 19</b>	Dosificación de mezcla suelo - Terrasil para la muestra M-1 .....	56
<b>Tabla 20</b>	Dosificación de mezcla suelo- Terrasil para la muestra M-2.....	57
<b>Tabla 21</b>	Dosificación de mezcla suelo-Terrasil para la muestra M-3.....	57
<b>Tabla 22</b>	Parámetros de compactación de la muestra M-1 y Terrasil.....	57
<b>Tabla 23</b>	Parámetros de compactación de la muestra M-2 y Terrasil.....	58
<b>Tabla 24</b>	Parámetros de compactación de la muestra M-3 y Terrasil.....	59
<b>Tabla 25</b>	Variación del índice de grupo (IG) .....	64



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Relaciones volumétricas con las tres fases en un suelo arcilloso .....	23
<b>Figura 2</b>	Límites de Atterberg .....	29
<b>Figura 3</b>	Carta de Casagrande para suelos finos y orgánicos .....	34
<b>Figura 4</b>	Ubicación local del proyecto .....	42
<b>Figura 5</b>	Curva granulométrica de la muestra C1 .....	50
<b>Figura 6</b>	Curva granulométrica de la muestra C2 .....	51
<b>Figura 7</b>	Curva granulométrica de la muestra C3 .....	52
<b>Figura 8</b>	Índice de plasticidad del suelo con el aditivo Terrasil .....	54
<b>Figura 9</b>	Curvas de compactación M-1 y mezclas con Terrasil .....	58
<b>Figura 10</b>	Curvas de compactación M-2 y mezclas con Terrasil .....	59
<b>Figura 11</b>	Curvas de compactación M-3 y mezclas con Terrasil .....	60
<b>Figura 12</b>	Parámetros de compactación de la muestra M-1 .....	61
<b>Figura 13</b>	Parámetros de compactación de la muestra M-2 .....	63
<b>Figura 14</b>	Parámetros de compactación de la muestra M-3 .....	63

## RESUMEN

La necesidad de ejecutar obras como de transporte vial en zonas donde carecen de material que reúnan las características exigidas cada vez es más común, es así que hay un alto índice de carreteras que no están asfaltadas generando pérdidas en la población, tal es así que esta investigación el objetivo fue determinar la influencia del Terrasil en los parámetros de compactación en suelo arcilloso de baja plasticidad, para eso se seleccionó tres muestras de tres calicatas de profundidad mayor a 1,50m, las muestras de suelo se sometieron a los diferentes ensayos y se obtuvo sus características y propiedades físicas, se hizo la clasificación del suelo con los métodos AASHTO y SUCS determinándose como suelos arcillosos CL y suelos tipo A-7-6(18), A-6(8), A-6(8) respectivamente, posteriormente se realizaron los ensayos de Proctor Modificado, primero sin aditivo y se obtuvo  $D_{smáx}$ : 1,610 g/cm<sup>3</sup>,  $W_{opt}$  : 20,7 % para el suelo M-1;  $D_{smáx}$ : 1,863 g/cm<sup>3</sup>,  $W_{opt}$ : 14,5 % para el suelo M-2 y  $D_{smáx}$ : 1,906 g/cm<sup>3</sup>,  $W_{opt}$  : 12,5 % para el suelo M-3 ; segundo el ensayo proctor modificado con Terrasil al 0,50 l/m<sup>3</sup>, 1,00 l/m<sup>3</sup> y 1,50 l/m<sup>3</sup>; así que, esta investigación determinó variación en los parámetros de compactación de suelos arcillosos de baja plasticidad en las tres muestras, en la muestra M-1 se obtuvo mayor variación con la dosificación de 1,50 l/m<sup>3</sup> donde  $D_{smáx}$  varía 6,02 % y  $W_{opt}$  en 1,6 %; la muestra M-2 obtuvo mayor variación con la dosificación 1,00 l/m<sup>3</sup> el cual  $D_{smáx}$  varía en 1,6 % y  $W_{opt}$  en 1,7 %; en M-3 resultó mayor variación con la dosificación de 0,50 l/m<sup>3</sup> donde  $D_{smáx}$  varía 3,7 % y  $W_{opt}$  1,4 % ; del mismo modo, el estabilizante Terrasil ha reducido el valor de IP, en M-1 de 18 % a 11 %; en M-2 de 12 % a 6 % y en M-3 de 13 % a 5 %, por lo tanto, se concluye que el estabilizante Terrasil influye positivamente en los parámetros de compactación y en el índice de plasticidad del suelo arcilloso CL.

**PALABRAS CLAVE:** Compactación, Estabilización, Suelo arcilloso, Aditivo, Proctor Modificado, Terrasil.

## ABSTRACT

The need to execute projects such as road transport in areas where the lack of material that meets the required characteristics is increasingly common, therefore, there is a high rate of non-paved roads, generating losses in the population. In view of this, the objective of this research was to determine the influence of TerraSil on the compaction parameters in clay soil with low plasticity. For this purpose, three samples from three pits with a depth greater than 1.50 m were selected. The soil samples were subjected to different tests and their characteristics and physical properties were obtained, the soil was classified with the AASHTO and SUCS methods, determining it as CL clay soils and soils type A-7-6(18), A-6(8), A-6(8) respectively. Subsequently, the Modified Proctor tests were carried out, first without additive  $D_{smax}$ : 1,610 g/cm<sup>3</sup>,  $W_{opt}$ : 20.7% for soil M-1;  $D_{smax}$ : 1.863 g/cm<sup>3</sup>,  $W_{opt}$ : 14.5% for soil M-2 and  $D_{smax}$ : 1.906 g/cm<sup>3</sup>,  $W_{opt}$ : 12.5% for soil M-3 were obtained; second, the modified proctor test with TerraSil at 0.50 l/m<sup>3</sup>, 1.00 l/m<sup>3</sup> and 1.50 l/m<sup>3</sup>; as a result, this research determined variation in the compaction parameters of low plasticity clay soils of the three samples. In sample M-1, greater variation was obtained with the dosage of 1.50 l/m<sup>3</sup>, where  $D_{smax}$  varied 6.02%. and  $W_{opt}$  1.6%. Sample M-2 obtained the greatest variation with the dosage of 1.00 l/m<sup>3</sup>, where  $D_{smax}$  varied 1.6% and  $W_{opt}$  1.7%. In sample M-3 there was greater variation with the dosage of 0.50 l/m<sup>3</sup>, where  $D_{smax}$  varied 3.7% and  $W_{opt}$  1.4%. Similarly, the stabilizer TerraSil has reduced the IP value, in M-1 from 18% to 11%; in M-2 from 12% to 6% and in M-3 from 13% to 5%. On that account, it is concluded that the TerraSil stabilizer positively influences the compaction parameters and the plasticity index of the CL clay soil.

**Keywords:** Compaction, Stabilization, Clay soil, Additive, Modified Proctor, TerraSil.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Con la creciente demanda de construir obras de infraestructura vial en zonas que están conformadas por suelos que no cumplen con las características para un suelo de fundación se opta por realizar el mejoramiento del suelo ya sea con aditivos, o con suelos de préstamo, mediante la explotación de canteras, generando impactos tanto positivos y negativos como: generación de partículas, gases de combustión, ruido, vibraciones, desestabilidad de taludes, desmonte, reducción de cobertura vegetal, perturbación y alejamiento de la fauna, afecciones a la salud, alteración de la calidad visual del paisaje (Walsh Perú S.A., 2005).

Proyectos como carreteras en buen estado son deficientes en países que se encuentran en vías de desarrollo tal es así que en Perú según el MTC para el año 2022, el 16 % de las redes viales nacionales no estaba pavimentada; el 82 % de la red vial departamental y 97 % de la red vial vecinal sin pavimentar. Esta situación no solamente es para Perú sino también para América Latina y el Caribe los que presentan una infraestructura vial insuficiente generando problemas cruciales como: deficiente conectividad en zonas remotas, desigualdad en el desarrollo de las regiones y por ende disparidad en la población, incremento en el costo de transporte, restringe el avance económico como por ejemplo desarrollo de turismo, comercio y explorar nuevos mercados; obstáculos en el transporte, generando retrasos en el traslado de la población , bienes e insumos (BID, 2021, como se citó en ESAN Intelligence, 2023).

Para fines del año 2022 se registró un aumento de accidentes de tránsito en 12,4 %, respecto del año 2021 causando víctimas mortales y pérdidas económicas, registrándose un total de 53 544 heridos, 3 312 fallecidos en un total de 83 881 accidentes de tránsito que ocurrieron, de cuales más de 2 500 accidentes se debieron a una mala infraestructura y señalización de la vía (Defensoría del Pueblo, 2023).

En el departamento de Cajamarca según MTC- SINAC 2021, hay mas de 12 mil kilometros de vias sin pavimentar y muchas de ellas se encuentran en malas condiciones.

En la investigación se realizó la estabilización de suelos arcillosos de baja plasticidad CL mediante el uso del aditivo Terrasil, según ficha técnica el aditivo compuesto al 100 % por órganosilanos, soluble en agua, estable al calor y la radiación

ultravioleta, su principal acción por tanto consiste en la impermeabilización de suelos y sub suelos confiriéndole propiedades hidrófobas<sup>1</sup> permanentes. Terrasil es distribuido en el Perú por la empresa BREM S.A.C.-Environmental Solutions.

### **1.1 Planteamiento del problema**

Los suelos arcillosos generalmente se caracterizan por su alto grado de plasticidad, lo que implica tener mayor cuidado cuando estos suelos estén presentes en el desarrollo de un proyecto como vías, rellenos mejorados, diques, etc. Los suelos finos y plásticos son muy sensibles al agua y poseen una baja capacidad de drenaje provocando una disminución de su rendimiento y a veces imposibilita su compactación, tal es así que, para realizar obras en infraestructura de transporte como carreteras, puertos, aeropuertos, por razones económicas y medioambientales se recomienda hacer uso en mayor parte de los suelos propios para el relleno de terraplén, el cual necesita cumplir el grado de calidad correspondiente en suelos que no cuentan con las características normadas, siendo necesario realizar un tratamiento de suelos (ANCADE; ANTER; IECA, 2008).

Nuestro país que demanda de vías terrestres en buenas condiciones y que garanticen seguridad a los usuarios también requiere de nuevos productos como estabilizadores o aditivos que brinden soluciones rápidas y sostenibles. Las altas cifras de infraestructura vial que no cuenta con una pavimentación están representando un riesgo en la población peruana sobre todo en periodos de lluvia y en casos como fenómenos del niño, sobre todo en las zonas más alejadas del país.

Cajamarca con una variada geología presenta arcillas y lutitas expansivas (Alva Hurtado J. , 2020), es un departamento que demanda de obras como vías de comunicación no es ajeno al uso de nuevas alternativas como los aditivos que logran alcanzar mejoras en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos. Actualmente la falta de conocimiento en el uso de nueva tecnología como la aplicación de aditivos estabilizantes, en el mejoramiento periódico de las vías, que se realiza en la capa de rodadura y también su uso en el proceso constructivo a nivel de subrasantes; han generado pérdidas en los beneficiarios con el traslado de sus productos, riesgos en

---

<sup>1</sup> Hidrófobo. - significa que repele al agua; en tal caso el agua no se desplaza por la superficie, sino que se agrupa en forma esférica.

épocas de lluvias y contaminación del medio ambiente por el polvo que se ocasiona por el tráfico.

Asimismo, Cajamarca ciudad debido a la expansión urbana cuenta con sectores, como el sector Huacariz que está en proceso de desarrollo urbano en la cual hay una creciente necesidad de mejoramiento de sus calles que aún no están pavimentadas, éstas debido al desgaste del tráfico y las condiciones ambientales, en épocas de lluvia se vuelve lodo y en verano el polvo que se genera es abundante, entonces es necesario brindar facilidades para trabajar en suelos arcillosos, a la población.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cuál es la influencia del Terrasil en los parámetros de compactación en suelo arcilloso de baja plasticidad del sector Huacariz, Cajamarca?

## **1.3 Justificación de la investigación**

La finalidad del uso del aditivo Terrasil es mejorar las propiedades del suelo arcilloso de baja plasticidad, presente en mayor porcentaje en el sector Huacariz, al aplicar el aditivo en la estabilización de suelos arcillosos de baja plasticidad resulta como una nueva alternativa de solución ante las obras de infraestructura vial que se proponga realizar. Anteriormente el material utilizado en el mejoramiento de las calles es el afirmado, pero al considerarse en esta investigación este nuevo producto con el que se mejora la estabilidad del suelo entonces resulta recomendable su utilización al momento de tomar decisiones acerca del uso del aditivo mediante una óptima aplicación.

Algunos de los criterios que se desarrollen en esta investigación podrán ser analizados para su aplicabilidad en la construcción de obras de ingeniería que fueran a ser cimentadas bajo la utilización de suelo arcilloso de baja plasticidad.

## **1.4 Alcances o delimitación de la investigación**

La investigación se desarrolló en la Ciudad de Cajamarca, en el sector Huacariz (lotización Santa María y Villa Huacariz), Vías: Av. Vía de Evitamiento Sur y Av. Industrial , utilizando las muestras de suelo arcilloso de baja plasticidad obtenido de las calicatas, las muestras se sometieron a ensayos de laboratorio adicionando la cantidad de aditivo calculado con las dosificaciones de: 0.50 l/m<sup>3</sup>, 1.00 l/m<sup>3</sup> y 1.50 l/m<sup>3</sup>; en el cual se obtuvieron resultados favorables mediante el ensayo de plasticidad y de proctor modificado.

Los resultados obtenidos en esta investigación están dirigidos a aquellos lectores e investigadores con los que tenga relación el tema de investigación que se realice, ya que estos resultados tienen un alcance referencial sobre el uso del aditivo estabilizador Terrasil, el mismo que tiene la capacidad de mejorar las propiedades físicas de los suelos del tipo CL.

## **1.5 Limitaciones**

En esta investigación no se la llegado a realizar el análisis de la composición química de las muestras de suelo arcilloso y del agua que se ha empleado para los ensayos de proctor modificado.

En esta investigación no se ha llegado a realizar el ensayo de Californian Bearing Ratio (CBR).

## **1.6 Objetivos**

### **Objetivo general**

Determinar la influencia del Terrasil en los parámetros de compactación en suelo arcilloso de baja plasticidad del sector Huacariz, Cajamarca.

### **Objetivos Específicos**

1. Determinar el índice de plasticidad en suelo arcilloso de baja plasticidad adicionando estabilizante Terrasil en las cantidades 0.50, 1.00 y 1.50 l/m<sup>3</sup>.
2. Determinar la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad del suelo arcilloso CL, incorporando estabilizante Terrasil en las cantidades 0.50, 1.00 y 1.50 l/m<sup>3</sup>.

## **1.7 Hipótesis**

La aplicación del aditivo Terrasil incrementa la densidad seca máxima y disminuye el contenido óptimo de humedad.



## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes teóricos de la investigación**

#### **2.1.1 Internacionales**

Aswari S., Prasada Raju G., (2022). En la investigación “Estabilización de suelos Expansivos con residuos industriales de coco y Terrasil “, realizada en Kakinada, India. concluye que: Que para suelos negros de algodón la mezcla de 0,75 % de fibra de coco y el 0,06 % de Terrasil, fue con la que se obtuvieron los mejores resultados; se redujo el contenido de humedad optimo en 3%, incrementó la densidad máxima seca en 4.3%; redujo el Limite liquido en 12.1%, el índice plástico en 4.5%. Por tanto, se ha logrado reducir la plasticidad del suelo y se ha incrementado su resistencia.

Meeravali, K., Rubén, N., Rangaswamyb, K. (2020). En su investigación “Estabilización de arcilla blanda utilizando nanomateriales: Terrasil”, realizada en Kuttanad, Kerala –India, concluye que: Al agregar Terrasil al suelo arcilloso en una cantidad de 0.02 a 0.07% del peso de suelo seco, se obtuvo una reducción del índice de plasticidad de 31.91% a 22.24% del suelo sin tratar a suelo arcilloso tratado con Terrasil. Asimismo, si se adiciona 0.03% de terrasil se comprueba que endurece el suelo tratado y mejora en un 2.5% aproximadamente la resistencia del suelo arcilloso.

Rodríguez Vincés, Diego I. (2016). En la investigación “Análisis comparativo de la compactación y humedad de la subrasante natural y la subrasante utilizando productos químicos biodegradables (Terrasil), de la vía ecológica del Cantón Quevedo, Provincia de Los Ríos”. Realizada en Ecuador. Concluye que: La estabilización de la subrasante con el aditivo Terrasil es ventajosa ya que impermeabiliza el suelo y mejora su resistencia como en arcillas, limos y arenas. Además, el autor concluye con su investigación que después de 7 días de curado luego de realizar los ensayos de campo y laboratorio el suelo se vuelve hidrófobo o también considerado como suelo impermeable.

### **2.1.2 Nacionales**

Gonzales Zevallos, J.R. (2022). En la investigación “Estudio comparativo de estabilización química con terrasil y Permazyme para afirmado del camino vecinal Santiago Pampa – Pampa Yanamayo, Sandia 2022”, realizada en Lima, concluye que: Agregando  $1.5 \text{ kg/m}^3$  y  $2.0 \text{ kg/m}^3$  de Terrasil se obtiene una reducción de 0.91% y 0.82% del contenido óptimo de humedad y respecto a la densidad seca máxima se tiene un aumento considerable, porque para  $1.50 \text{ kg/m}^3$  de terrasil y  $1.50 \text{ l/30m}^3$  de Permazyme valores de  $2.190\text{gr/cm}^3$  y  $2.168\text{gr/cm}^3$  se tiene un incremento de  $0.049\text{gr/cm}^3$  y  $0.027\text{gr/cm}^3$ , respectivamente.

Álvarez Benites, N.C. y Gutiérrez Gallegos, J.A. (2020). En la Tesis “Estudio experimental del efecto en el comportamiento mecánico al adicionar caucho triturado en un suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del caserío de Callampampa-Llama-Cajamarca”, realizada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Una de sus conclusiones en referencia es que : al obtener el contenido óptimo de humedad y la máxima densidad seca (MDS), mediante el Proctor Modificado tanto en suelo arcilloso natural y en suelo arcillosos mezclados con caucho triturado en las distintas cantidades (C0.5%, C1.5%, C2.5% y C3.5%); se observó que incrementa la densidad seca de las mezclas respecto al suelo natural, para una cantidad de C3.5 hubo un incremento en 1.76%, para C1.5 en 0.52% y para C2.5 se incrementó en 1.62%, deduce que la adición de caucho a la mezcla de suelo arcilloso hizo que los espacios vacíos del suelo disminuyan y con ellos la muestra tenga un comportamiento menos expansivo. Además, se observó una disminución del contenido de humedad óptimo respecto al suelo natural con lo cual se concluye que, entre mayor adición de caucho a la muestra, esta necesita menor cantidad de agua para tener un contenido de humedad óptimo.

Flores Quiñones, E.R. y Flores Sanchez, A.L. (2020). En la Tesis “Influencia de los aditivos con enzimas orgánicas Terrasil y Perma Zyme para la estabilización de la subrasante de una carretera no pavimentada, Mache, Otuzco, La Libertad 2019”, Trujillo, concluye que: comparándose los resultados de la capacidad de soporte al 95% realizados con la adición de los aditivos Terrasil y Perma Zyme, de las 6 muestras realizadas 3 muestras estudiadas tuvieron un mayor incremento en su

capacidad de soporte con el aditivo Terrasil y las otras 3 tuvieron un incremento con el aditivo Perma Zyme que fueron suelos con clasificación CH y ML, las diferencias encontradas con ambos aditivos variaron entre 0.5% a 10% en su capacidad de soporte.

### **2.1.3 Locales**

Salcedo Espinoza, M.S. (2021). En la investigación “Caracterización del uso de estabilizantes químicos para mejorar la capacidad portante de pavimento a nivel de afirmado y propuesta de aplicación, Cajamarca 2021”, realizada en Cajamarca, El autor concluye que: al utilizar los estabilizantes químicos entre ellos el Terrasil disminuye el espesor de la carpeta de afirmado, dependiendo de la cantidad de dosificación de aditivo que se utilice.

Marín Abanto, N.K. (2021). En la investigación “Influencia de la aplicación de cloruro de sodio en la estabilización de suelos arcillosos para uso como subrasante mejorada del pavimento de la carretera Cajamarca - Huacariz 2021”, Cajamarca, el autor concluye que: para una calicata realizada a 1.50 m se obtuvo suelos de tipo A-6 (9), A-6(10), A-6(11) y CL, al adicionarle el cloruro de sodio en 5 %, 10 %, 12 % respecto del peso de la muestra, el índice de plasticidad IP disminuye en 3%; el contenido óptimo de humedad disminuye en 0.29% y la densidad seca máxima incrementa en 0.02 por cada incremento de sodio.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Mecánica de suelos**

Mecánica de suelos se aplica a los distintos estudios de las propiedades que se realizan para poder determinar con mayor discernimiento uno u otro tipo de suelo que ha de ser utilizado en el área de la ingeniería civil. Mediante el análisis o estudio de los resultados obtenidos se busca describir y diferenciar los suelos que muestren un determinado comportamiento ante el uso que ha de ser dado. “Los suelos, siendo los materiales de obra más antiguos y de comportamiento complejo en la ingeniería, requieren de comprensión profunda de sus características físicas y mecánicas, que permitan articular etapas como el manejo de métodos rutinarios de análisis y diseño” (Gutiérrez, 2016, p. 27).

### 2.2.1.1 Suelos

Para Macías, L. et al (2018) definen el suelo como un agregado no cementado con granos minerales, materia orgánica descompuesta sólida y con elemento líquido y gas que se encuentran ocupando los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El concepto de suelo tiene una definición de acuerdo al área de estudio tratado, es así que definir suelo como material de fundación se alude el concepto dentro del área de ingeniería civil.

Los agregados sólidos de un suelo que están compuestos de granos minerales son el producto de la descomposición de las rocas, mediante intemperización o erosión. Los resultados de la meteorización o intemperización de las rocas pueden permanecer en el mismo lugar o también pueden ser trasladados a otros lugares por efecto del agua, hielo y efectos de la gravedad (Das B. , 2015).

**Tipos de suelos.** Los tipos de suelos de fundación se ha clasificado de acuerdo a su origen y de acuerdo al tamaño de sus partículas (**Das B. , 2015**).

#### A. Por su origen

**Suelos residuales.** - Son aquellos suelos que permanecen donde se forman y cubren generalmente la superficie rocosa de la cual provienen.

**suelos transportados.** - Es una denominación a los suelos residuales que han sido removidos de su lugar de formación por diferentes agentes de transporte como las fuerzas aluviales (fluviales, depositados por agua en movimiento), Glaciales, eólicos.

**Turbas.** - Suelos producto de la descomposición de materia orgánica.

**Orgánico.** - Mezcla de turba y suelo inorgánico, tienen un contenido de agua natural por entre los 200 y 300 % son altamente compresibles (Macías et al.,2018, p.59).

#### B. Por el tamaño de sus partículas. Independientemente del origen

del suelo los tamaños de las partículas que conforman un tipo de suelo por lo general varían en un amplio rango. Dependiendo del tamaño de las partículas que predomina en general los suelos son llamados, *grava, arena, limo o arcilla*, hay organizaciones

(Tabla 1) que desarrollaron límites de tamaños de las partículas para denominar y describir un suelo (Das B. , 2015) .

*Las gravas.* - Son fragmentos de rocas en que en ocasiones contienen partículas de cuarzo, feldespato y otros minerales.

*La arena.* - Está formado principalmente por partículas de cuarzo y feldespato, aunque también están presentes a veces otros granos minerales.

*Los limos.* - Son fracciones microscópicas de suelo que consisten en granos muy finos de cuarzos y algunas partículas en forma de escamas que son fragmentos de minerales micáceos<sup>2</sup>.

*Las arcillas.* - Son principalmente partículas sub microscópicas en forma de escamas de mica, están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratado y otros minerales (Das B. , 2015).

**Tabla 1**

Límites de tamaños de suelos separados

Tamaño del Grano (mm)				
Nombre de la Organización	Grava	Arena	Limo	Arcilla
<b>Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)</b>	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
<b>Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)</b>	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
<b>Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)</b>	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
<b>Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (U.S.Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials) SUCS</b>	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	<b>Finos (es decir, limos y arcillas) &lt; 0.075</b>	

Fuente: (Das B. , 2015).

<sup>2</sup> Minerales micáceos. - Conjunto de minerales alcalinos compuestos por mica, el cual, junto con el cuarzo y el feldespato son los minerales que más predominan en la corteza terrestre.

*Nota.* En la tabla mostrada, se describe los tamaños de los granos de suelo según el tipo y de acuerdo a cada organización.

Como se muestra en la Tabla 1 las arcillas se definen como partículas menores a 0.002mm. en algunos casos, las partículas de tamaño entre 0.002mm y 0.005mm también se denominan arcillas (Das B. , 2015).

#### **a) Suelos arcillosos.**

Las arcillas, un tipo de suelo que está compuesto por partículas casi imperceptibles al tacto, las cuales poseen características únicas que lo diferencia de los otros tipos de suelos. Para Duque & Escobar (2016) “Los suelos arcillosos son grupos minerales definidos como caolinita, illita y montmorillonita, donde participan estructuras octaédricas y tetraédricas. La arcilla, como el humus, posee propiedades coloidales. En el sentido mineralógico, son cristales microscópicos cuyos átomos están dispuestos en planos” (p. 23). Indicando también que las arcillas poseen una gran capacidad de intercambio iónico.

Por otro lado, Das (2015) describe que un suelo arcilloso se define como tal en base al tamaño (Tabla 1) de sus partículas, aunque estos estén compuestos por partículas que necesariamente no sean minerales de arcilla.

#### **2.2.2 Propiedades físico- mecánica de los suelos.**

El suelo que comúnmente es utilizado como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y que también sirve para dar soporte en las cimentaciones de obras a construir tiene propiedades y características que impone un análisis y estudio de las mismas. Es así que, es importante conocer sus propiedades como: origen, distribución granulométrica, capacidad de drenaje, compresibilidad, resistencia al corte y capacidad portante (Macías et al., 2018).

Según Crespo (2012) es fundamental el conocimiento de las características físicas o mecánicas de los suelos, ya que mediante una adecuada interpretación de un ingeniero sobre los distintos suelos que han de ser sometido a las cargas, éstos puedan realizar predicciones más precisas sobre su comportamiento.

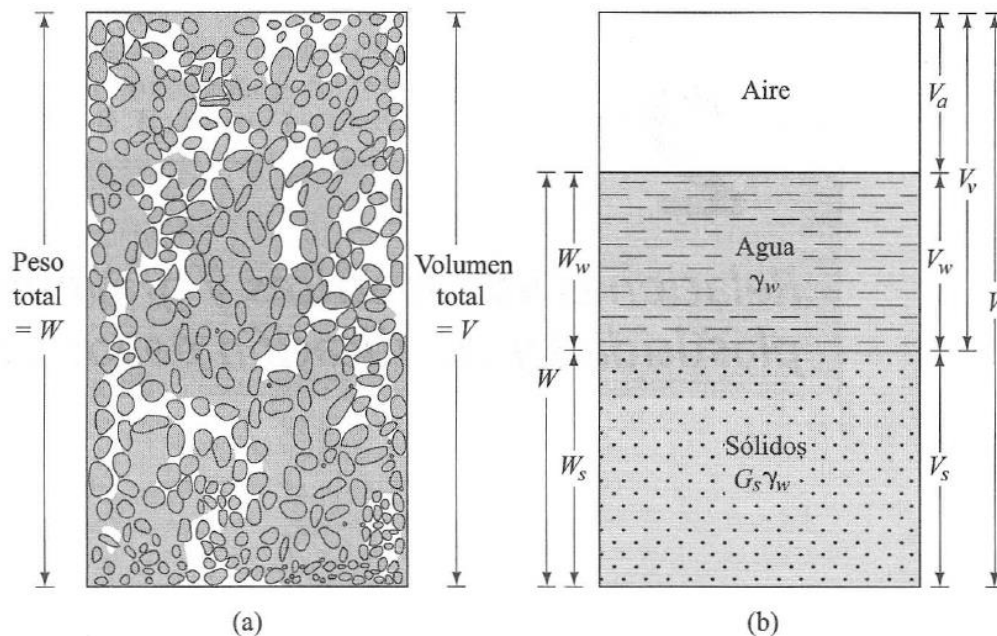
## A. Contenido de humedad.

Es la cantidad de agua presente en el suelo respecto al valor del peso de suelo analizado en estado seco (sólido). Este se expresa en porcentaje (%), se determina dividiendo el peso del agua de un espécimen entre el peso sólido de un espécimen. Para obtener el peso del agua presente en una muestra de suelo es necesario someterlo a una variación de temperatura hasta obtener el suelo seco o sólido que mantenga un peso constante (Duque Escobar & Escobar Potes, 2016).

Las relaciones volumétricas que se usan frecuentemente en las tres fases de una muestra de suelos son la relación de vacíos presentes como: la porosidad y el grado de saturación. Así mismo, el contenido de humedad y el peso específico son las relaciones gravimétricas que son usadas de forma más frecuente al momento de conocer las fases del suelo (Das B. , 2015).

### Figura 1

*Relaciones volumétricas con las tres fases en un suelo arcilloso*



Fuente: (Das B. , 2015)

*Nota:* En la figura (a) se muestra volumen  $V$  y peso  $W$  de suelo dispuestos en estado natural. En la figura (b) se muestra el suelo separado en las fases, sólido, agua y aire. Adaptado de *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica cuarta edición* (p.50), por B. Das, 2015, Thomson Editores S.A.

El volumen total de la muestra en la figura 1 se expresa de la siguiente manera en la ecuación 1:

$$V = V_S + V_V = V_S + V_W + V_a \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$V_S$  = volumen de sólidos de suelo

$V_V$  = volumen de vacíos

$V_W$  = volumen de agua en los vacíos

$V_a$  = volumen de aire en los vacíos

Asumiendo que el peso del aire es despreciable entonces se tiene el peso como:

$$W = W_S + W_W \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$W_S$  = peso de los sólidos del suelo

$W_W$  = peso del agua

El contenido de humedad se expresa con la siguiente ecuación:

$$W\% = \frac{W_W}{W_S} * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

#### **a) Aplicación de método (ASTM D-2216-19).**

Para obtener el contenido de humedad, la muestra de suelo húmeda es llevada al horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , generalmente por el transcurso de 24 horas, la pérdida de agua en el secado se considera el peso del agua, entonces el contenido de agua será el peso del agua, respecto del peso de la muestra seca obtenida del horno. Cabe indicar que la muestra obtenida para el ensayo mantenga el contenido de humedad del material del cual es representativa.

#### **B. Peso específico y densidad de suelos.**

Se le conoce al peso del suelo por cada unidad de volumen. Para Das (2015), "El peso específico se expresa en kilonewtons por metro cubico ( $\text{kN/m}^3$ ). Ya que el newton es una unidad derivada, a veces puede ser conveniente trabajar con densidades ( $\rho$ ) de suelo. La unidad de densidad SI es el kilogramo por metro cubico ( $\text{kg/m}^3$ )" (pp. 51-52).



Siendo las ecuaciones de la densidad como:

$$\rho, Dh = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$\rho$  = densidad del suelo (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = densidad seca del suelo (kg/m<sup>3</sup>)

$m$  = masa total de la muestra del suelo (kg)

$m_s$  = masa de sólidos de suelo en la muestra (kg)

### C. Peso unitario de suelos (NTP 400. 017. 1999)

Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario suelto o compactado y el cálculo de vacíos en el agregado fino y grueso.

**Procedimiento con pala:** El recipiente con medida conocida se llena con una pala o cuchara hasta rebosar, descargando el material desde una altura no mayor de 50 mm (2") por encima de la parte superior del recipiente y material que sobra se elimina con una regla.

El peso unitario de un suelo es el producto de su densidad por la gravedad. El valor puede variar de acuerdo al contenido de agua del suelo además de una serie de factores que se deben considerar. Este valor también tiene variación desde un suelo en estado seco a un suelo que está en estado saturado (Duque Escobar & Escobar Potes, 2016).

Para calcular el peso unitario compactado o suelto será con la siguiente fórmula.

*Ecuación 6*

$$PUS = \frac{(G - T)}{V} \text{ kg/m}^3$$

Donde:

$PUS$  = Peso unitario del suelo en kg/cm<sup>3</sup>

$G$  = Peso del recipiente de medida más el suelo en kg.

$T$  = peso del recipiente de medida en kg

$V$  = Volumen de la medida en m<sup>3</sup>

#### **D. Granulometría de suelos.**

La granulometría de los suelos, permite estudiar y conocer el tamaño de las partículas y sedimentos presentes en una muestra de suelo, también determinar la importancia que tendrán según la fracción de suelo que representen. Si bien el análisis granulométrico es suficiente para gravas y arenas, sin embargo, cuando se trata de arcillas, limos (suelos finos), el estudio se debe completar con ensayos que definan la plasticidad del material (COTECNO.cl, 2022).

La granulometría en los suelos representa la forma de distribución de los tamaños en una muestra de suelo (MTC, 2014).

#### **E. Análisis granulométrico (NTP 339.128-1999).**

El análisis granulométrico consiste en realizar la valoración cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los suelos.

##### **a) Método por lavado (ASTM D 422)**

Este método es empleado cuando la muestra presenta gran cantidad de partículas finas (cohesivas).

En este método se emplean los tamices que cumplan con la norma ASTM E11 que son los siguientes:

**Tabla 2**

*Juego de tamices según ASTM E11*

<b>Designación ASTM</b>	<b>Tamices</b>
3 pulg	75 mm
2 pulg	50 mm
1 ½ pulg	37.5 mm
1 pulg	25 mm
¾ pulg	19.0 mm
3/8 pulg	9.5 mm
Nº 4	4.75 mm
Nº 10	2 mm
Nº 20	850 µm
Nº 40	425 µm
Nº 60	250 µm
Nº 140	106 µm
Nº 200	75 µm

Fuente: NTP 339.128-1999

### **b) Curva Granulométrica**

Es el gráfico que resulta al unir los pares ordenados formados por los resultados del porcentaje de suelo que pasan los tamices en el eje de las ordenadas y las medidas de los tamices (que representan los tamaños de los granos de suelo) en el eje de las abscisas, en una escala semilogarítmico. Para el eje de las ordenadas se representan en escala aritmética y el eje de las abscisas en escala logarítmica (Duque Escobar & Escobar Potes, 2016).

### **2.2.3 Plasticidad y consistencia de los suelos**

Albert Mauritz Atterberg (1846-1916) un científico sueco, quien, en 1911, con sus investigaciones de química y agrícola define los límites de la consistencia de un suelo de grano fino, permitiendo su clasificación. Albert Atterberg mediante sus investigaciones determinó que la plasticidad es una propiedad única y solamente en suelo cohesivos, sugiriendo clasificar los suelos con partículas menores de 2 µm (0.002 mm) como arcillas. Posteriormente Karl Terzaghi y Arthur Casagrande a partir

de 1930, reconociendo la importancia de la plasticidad introdujeron su uso para aplicarlo en la ingeniería geotécnica. Asimismo Arthur Casagrande, mejoró la técnica de Atterberg y estandarizó las pruebas con las cuales se determinan el límite líquido, límite plástico y límite de contracción de los suelos cohesivos. (Consulting, 2022)

Para Bañón y Beviá (2015), el comportamiento de un suelo está muy influenciado por la presencia de agua en su interior, el cual es más notorio cuanto más pequeños son las partículas que componen la muestra de suelo, siendo especialmente más relevante en suelos que son compuestos de suelo arcilloso debido a que, en estos, los fenómenos de interacción superficial se imponen a los de otro suelo.

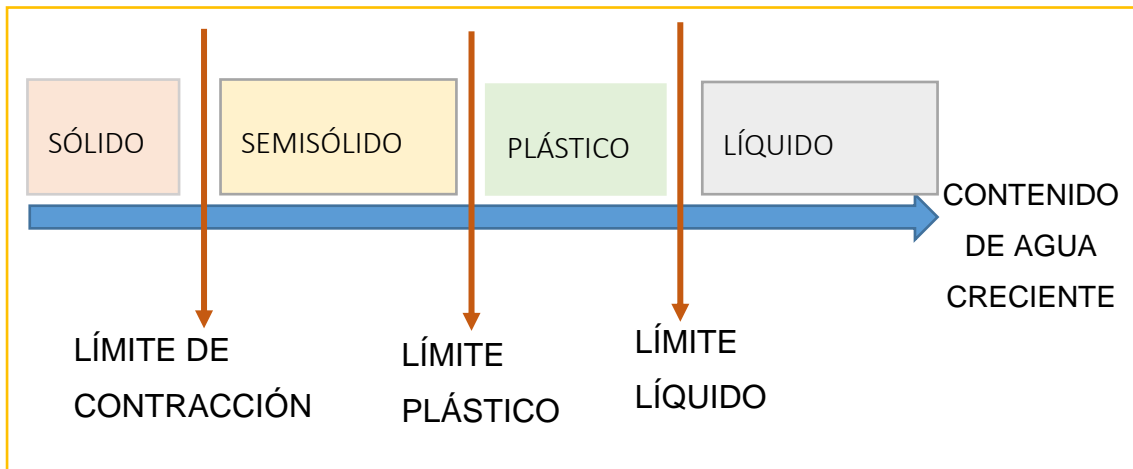
### **2.2.3.1 Límites de Atterberg.**

A inicios de 1900, Albert M. Atterberg, desarrolló un método para poder conocer la consistencia de los suelos finos sometidos a diferentes contenidos de humedad, cuando un suelo se somete a una elevada cantidad de agua, este suelo fluye como un líquido y cuando este es sometido a poca agua se comporta como un elemento sólido frágil. Entonces la naturaleza y comportamiento del suelo depende de su contenido de agua connotándolo en cuatro estados básicos como son: estado sólido, semisólido, plástico y líquido (Das B. , 2015), así como, se muestra en la Figura 2.

Atterberg fue el primer científico que relacionó el grado de plasticidad de un suelo, entre el contenido de agua y el peso seco de una muestra. Además, el definió los cuatro estados de consistencia de los suelos y determinó a la fronteras de estos estados básicos como límite líquido, límite plástico y límite de contracción (Bañón Blázquez & Beviá García, 2015).

**Figura 2**

*Límites de Atterberg*



Fuente: (Das B. , 2015)

*Nota.* En la figura 2 se puede ver el contenido de agua en porcentaje en la transición de estado sólido a semisólido se define como límite de contracción, el contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico y de estado plástico a estado semilíquido es el límite líquido, denominándose así, como los Límites de Atterberg. Adaptado de Fundamentos de Ingeniería Geotécnica cuarta edición (p.64), por B. Das, 2015, Thomson Editores S.A.

- a) Límite líquido (aplicación del método ASTM D-4318).** El límite líquido es la determinación del contenido de agua que se requiere para pasar de un estado de consistencia plástico a líquido, el proceso de ensayo del límite líquido se detalla en la guía de laboratorio de mecánica de suelos I-UNI (2019).

El método multipunto según el laboratorio de mecánica de suelos I-UNI (2019), es aquel donde se necesitan tres ensayos como mínimo a diversos contenidos de humedad y número de golpes, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Rango del número de golpes para límite líquido*

<b>ENSAYO N°</b>	<b>RANGO "N" GOLPES</b>
<b>1</b>	25-35
<b>2</b>	20-30
<b>3</b>	15-25

Fuente: UNI (2019)

*Nota:* Rango del número de golpes con el cual se debe calcular el límite líquido al momento de cerrarse la ranura en la muestra, a diferentes contenidos de humedad.

Luego los datos son graficados en una escala semilogarítmica con la humedad en el eje de las ordenadas y el número de golpes en el eje de las abscisas y se traza una recta denominada "Curva de Fluidez", seguidamente se determina el límite líquido con humedad necesaria para que la ranura se cierre al aplicar 25 golpes. Cada golpe que se da en el proceso del ensayo equivale a 1 g/cm<sup>2</sup> que es igual a 0,1 kN/m<sup>2</sup> de resistencia cortante del suelo, por eso el contenido de humedad que representa al límite líquido corresponde a una resistencia cortante de 25 g/cm<sup>2</sup> o 2,5 kN/m<sup>2</sup> aproximadamente (Casagrande, 1932 citado por Das, 2001).

**b) Límite plástico (aplicación del método ASTM D-4318).**

El límite plástico es la determinación del contenido de humedad entre la frontera del estado de consistencia semisólido y el estado de consistencia plástico.

La norma ASTM D-4318 menciona que todos los límites de consistencia se determinan empleando el suelo que pase la malla N°40. La diferencia entre los valores del límite líquido y el límite plástico da como resultado el índice plástico (*IP*) del suelo :

$$IP = LL - LP \dots\dots\dots Ecuación 7$$

Donde:

Los límites líquido y plástico dependen generalmente de la cantidad de arcilla. Cuando no se puede determinar el índice plástico de un suelo se considera como un suelo *no plástico*, por tanto, el índice de plasticidad es cero.

El índice de plasticidad (*IP*) indica el rango de humedad a través del cual los suelos con cohesión tienen propiedades de un material plástico.

### **c) Índice de plasticidad**

Los minerales arcillosos, por lo general tienen forma de placa o laminar microscópica, esta forma de los minerales les confiere a los suelos arcillosos una gran *superficie específica*<sup>3</sup>. Es así que, para los minerales principales de arcilla como la caolinita, illita y montmorillonita es aproximadamente de 15 m<sup>2</sup>/g, 80 m<sup>2</sup>/g y 600 m<sup>2</sup>/g, respectivamente, lo cual nos indica que a mayor superficie específica va a poseer una lámina de agua adsorbida<sup>4</sup> más gruesa (Díaz Rodríguez, 2014).

Para Díaz (2014) un suelo muestra un comportamiento plástico dentro de un intervalo de humedad teniendo un límite inferior y un límite superior los mismos que están dados por los límites plástico y líquido, respectivamente y la diferencia de estos intervalos (Ecuación 7) se lo denomina el índice de plasticidad (*IP*) el cual también vendría a ser la cantidad de humedad en el rango plástico del suelo cohesivo (pp. 38-41).

Según lo que comenta Díaz (2014) las partículas de los suelos en el rango plástico mantienen una cohesión relativamente pequeña como para permitir el movimiento de las mismas pero que también es lo suficientemente grande para que estas partículas puedan llegar a deformarse y cambiar de posición. También considera a los límites de consistencia como bastos indicadores de resistencia del suelo, donde la resistencia del límite plástico es 200 kPa y la resistencia en el límite líquido de 2kPa aproximadamente. Entonces, el índice de plasticidad (*IP*) denota el incremento de la humedad en un suelo con el cual se llegaría a reducir la resistencia hasta en cien veces.

---

<sup>3</sup> *Superficie específica*. Relación entre el área total superficial y la masa unitaria

<sup>4</sup> *Adsorción*. Fenómeno físico donde un compuesto en fase gaseosa o líquida, se adhiere a la superficie de un sólido, manteniendo sus propiedades.

**Tabla 4**

*Rango de los límites de plasticidad según el tipo de suelo*

PARÁMETRO	TIPO DE SUELO		
	ARENA	LIMO	ARCILLA
(LL) límite líquido	15-20	30-40	40-150
(LP) límite plástico	15-20	20-25	25-50
(LR) límite de retracción	12-18	14-25	8-35
(IP) índice de plasticidad	0-3	10-15	10-100

Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2015)

*Nota.* En la tabla se muestra los rangos de valores de los límites de plasticidad en tipos de suelo como arena, limo y arcilla. Adaptado de *Valores típicos de consistencia del suelo* (p.11), por Bañón Blázquez & Beviá García, 2015, ResearchGate.

#### **2.2.4 Clasificación e identificación de suelos**

Los cálculos concatenados de las distintas propiedades de un suelo también tienen como propósito, establecer una división sistemática de los diferentes tipos de suelo de acuerdo a la similitud de sus caracteres físicos y de sus propiedades geomecánicas. Cumpliendo con una adecuada clasificación permitirá al ingeniero tener una noción a priori del comportamiento que debe esperar acerca de un determinado suelo a usar en una obra (Bañón Blázquez & Beviá García, 2015).

Por lo general puede ser suficiente conocer la granulometría y la plasticidad de un suelo, para poder predecir su comportamiento mecánico, y en cierto modo también facilita la comunicación e intercambio de ideas entre profesionales del sector, debido a su carácter universal (Bañón Blázquez & Beviá García, 2015).

##### **2.2.4.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**

La forma original de este método fue propuesta por Arthur Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el cuerpo de ingenieros del ejército durante la segunda guerra mundial. En cooperación con la Oficina de Restauración de Estados Unidos, el sistema fue revisado en 1952. Hoy en día, es ampliamente usado por los ingenieros (Das B. , 2015).



Este sistema de clasificación que se muestra en el Anexo A, presenta dos amplias categorías, suelos de grano grueso y suelos de grano fino.

### a) Los suelos de grano fino

Los suelos finos son aquellos que más del 50% de su peso pasa el tamiz N° 200 (0.075mm) y se dividen en 4 grupos:

- Arcillas (C)
- Limos (M)
- Arcillas Orgánicas (O) y Turbas (Pt)

La designación de cada uno de estos suelos con los símbolos está seguida por otra letra que depende de su consistencia como el límite líquido. Si el límite líquido es menor que 50% se denotará con L, y si el límite líquido es mayor que 50% entonces se denotará con H.

Arcilla. Clasificando a una arcilla según NTP 339.134,199 describe como la porción de grano fino de un suelo que tiene un IP igual o mayor que 4, y su ubicación dentro del gráfico de la Figura 3 cae dentro de la línea A o también sobre la línea "A".

Limo. Se clasifica como suelo fino de muy poca plasticidad o también no plástico su IP menor que 4, o que su ubicación en La Figura 3 de ubica por debajo de la línea "A".

Arcilla orgánica. La arcilla orgánica está compuesta por una cierta cantidad de materia orgánica capaz de influir en sus propiedades. Para su clasificación se puede considerar como una arcilla, solo que, el valor de su límite líquido varía en 75% luego de ser secado en el horno (NTP 339.134, 1999).

### Tabla 5

*Símbolos de grupo según SUCS*

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrememente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido bajo (<50)	L
Turba	Pt	Límite líquido alto (>50)	H

Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2015)

Nota. Adaptado de Manual de Carreteras II (p.21), por Bañón Blázquez & Beviá G.,2015, ResearchGate.

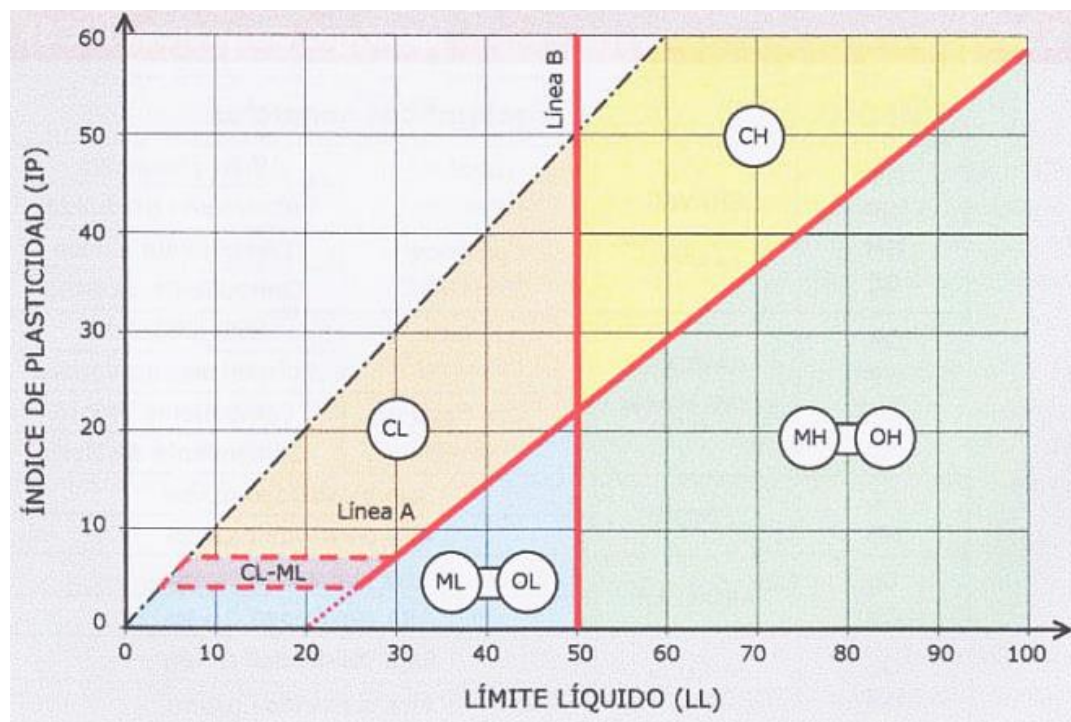
Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona límite líquido con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de Casagrande de suelos cohesivos, Figura 3, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:

Línea A:  $IP = 0.73 \times (LL - 2)$

Línea B:  $LL = 50$

**Figura 3**

*Carta de Casagrande para suelos finos y orgánicos*



Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2015)

Nota. El gráfico determina la clasificación del suelo fino según la ubicación del punto que determina el índice de plasticidad y del límite líquido. Tomado de *Manual de Carreteras II* (p.22), por Bañón Blázquez & Beviá García, 2015, ResearchGate.

### 2.2.4.2 Clasificación mediante método AASHTO (ASTM D 3282)

Este método cumple un procedimiento donde se clasifican los suelos en siete grupos con referencia en la determinación de las propiedades, como la distribución de las partículas o la granulometría, los límites de plasticidad e índice de plasticidad. (ASTM Internacional, 2016)

Los siete grupos como se detalla en el Anexo B son distribuidos como:  
A-1, A-2, A-3, suelos con características favorables para ser usados en construcción.  
A-4, A-5, A-6, A-7, son suelos con contenido de partículas finas: arcillas, limos.  
A-8, considerados material orgánico y/o turbas.

Cada grupo se evalúa mediante el índice de grupo calculado a partir de la siguiente formula empírica.

*Ecuación 8*

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Además, para suelos de los grupos A-2-6 o A-2-7, se emplea la ecuación:

*Ecuación 9*

$$IG = 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde:

$F$  = Material que pasa la malla N°200

$LL$  = Límite líquido

$IP$  = índice plástico

La norma además establece para el método, valores dentro de los cuales está comprendido el índice de grupo ( $IG$ ), el cual se detalla en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Tipo de suelo según valor del índice de grupo*

<b>INDICE DE GRUPO</b>	<b>SUELO DE ENSAYO</b>
IG > 9	Muy pobre
4 < IG < 9	Pobre
2 < IG < 4	Regular
1 < IG < 2	Bueno
0 < IG < 1	Muy bueno

Fuente: (MTC, 2014)

*Nota:* El índice de grupo es un valor positivo que está comprendido entre 0 a 20, o mayor pero cuando se tiene un valor negativo se considera con valor cero. Cuando un IG es mayor que 20 significa que este suelo no es utilizable en caminos, sin embargo, si el IG es = 0 es un suelo muy bueno para efectos de carreteras.

### **2.2.5 Compactación**

Ralph R. Proctor quería demostrar en laboratorio mediante una prueba, la compactación que se realizaba en campo con diferentes equipos que eran utilizados en ese entonces, llegando a proponer la prueba de compactación que actualmente lleva su nombre Prueba de Proctor, la cual ha sido modificada según como se indica en la norma ASTM D1557. R. Proctor al realizar sus ensayos de laboratorio vio que el peso volumétrico del suelo iba variando juntamente con su contenido de humedad, entonces estos resultados los graficó ingresando en el eje de las abscisas el contenido de humedad y en el eje de las ordenadas el peso volumétrico cuyos puntos formaron una curva, donde el punto máximo lo determinó como humedad óptima y peso volumétrico seco máximo, respectivamente (Crespo Villalaz, 2012).

Para Das (2015) los suelos sueltos que van a ser utilizados en obras de ingeniería deben ser compactados para que estos puedan aumentar sus pesos unitarios. La compactación de suelos es el acomodo de las partículas y la eliminación del aire mediante un proceso de energía mecánica que se le ejerce cumpliendo con ciertos parámetros. Entre sus principales características de la compactación es que aumenta la resistencia y la estabilidad de suelos que van a servir de cimentación, ya que se logrará de cierto modo aumentar su capacidad de carga.

### 2.2.5.1 Prueba de Proctor Modificada (ASTM D1557)

La norma determina todos los parámetros que se debe cumplir para realizar el ensayo o prueba.

En cada prueba el contenido de agua (contenido de humedad) del suelo compactado se determina en el laboratorio y los cálculos se procesan con la Ecuación 3. Con el contenido de humedad conocido, el peso específico seco  $\rho_s$  se calcula mediante la ecuación 10, el molde que se utiliza en el ensayo según la norma para suelos finos tiene las medidas indicadas en el figura del Anexo C.

$$\rho_s = \frac{\rho_h}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$w(\%)$ : contenido de agua

$\rho_s$ : densidad seca

$\rho_h$ : densidad húmeda

Los diferentes valores obtenidos de  $\rho_s$  se grafican con sus correspondientes contenidos de humedad. Y se obtiene el peso específico máximo ( $D_{sm\acute{a}x}$ ) y el contenido de agua óptimo ( $W_o$ ) para compactar el suelo (Das B. , 2015).

### 2.2.6 Estabilización

La estabilización de suelos se entiende por el proceso de mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo haciendo el uso de equipos mecánicos o también la incorporación de productos estabilizantes químicos, productos naturales o sintéticos. El propósito de realizar un proceso de estabilización de suelos es proporcionar mejoras en sus propiedades y que estas sean sostenibles o se mantengan en el tiempo (MTC, 2014).

Según ANCADE; ANTER; IECA, (2008) en el suelo estabilizado se busca básicamente el aumento de su capacidad de soporte, mejoramiento de su comportamiento frente a la presencia del agua y condiciones desfavorables del medioambiente y algunas veces se busca el incremento de la resistencia mecánica del suelo, pero proyectado a un largo plazo.

### **2.2.6.1 Tipos de estabilización**

Existen variadas técnicas para realizar la estabilización como por ejemplo emplear la sustitución y la combinación de suelos, así como, el empleo de agentes estabilizantes, como cal, cemento, escorias, emulsión asfáltica, utilizando geosintéticos, cualquiera sea el proceso que se realice, siempre culmina con la compactación del suelo, y que este proceso de estabilización sea de forma sencilla y sobre todo tenga ventajas económicas (MTC, 2014).

#### **A. Estabilización química**

Según se detalla en la Norma técnica E1109 (2004)- MTC sobre la estabilización química, como una tecnología basada en utilizar un producto químico comúnmente denominado estabilizador químico, que al agregar al suelo a estabilizar se debe hacer una mezcla indisoluble y homogénea de acuerdo como se detalla en las especificaciones técnicas de mismo. Al aplicar un estabilizador químico se tiene como objetivo principal dar al suelo tratado mejoras en sus propiedades de comportamiento en un proceso de construcción o al momento de ser puesta a servicio, una obra.

##### **a) Aditivos Estabilizantes (Norma CE.020 – suelos y taludes)**

Para tener en cuenta al momento de elegir un aditivo estabilizante, estos deben cumplir con las normas internacionales de certificación ISO y ser capaces de mezclarse fuertemente y de forma homogénea con el suelo a tratar. Los métodos, las dosificaciones y las pruebas de control que se deben realizar tienen que ser revisados por el personal técnico y también con el proveedor del producto antes de ser utilizado.

Se recomienda también que el personal responsable debe de elegir el aditivo que cuente con mejor afinidad en un determinado suelo, o de acuerdo a las características que presente las condiciones medio ambientales y geográficas donde este se va a utilizar. Asimismo, si se requiere obtener mejoras en el comportamiento estructural del suelo este debe contener un porcentaje mayor al 25 % en su composición de partículas finas cohesivas y que sean aditivos controladores de polvo.

Para los aditivos que son líquidos y solubles en el agua tomar en consideración la evaporación, pérdida de humedad, su solidificación, su aumento de la cohesión y su aumento de la resistencia.

## 2.2.7 Aditivo Terrasil

Terrasil es un aditivo conformado en su totalidad por organosilanos el cual lo vuelve impermeabilizante, capaz de repeler al agua, puede eliminar el hinchamiento. El aditivo es soluble, es estable al calor y a la radiación ultravioleta, con el silanol presente en su composición, este reacciona con los silicatos del suelo y le da características de impermeabilizante de suelos cambiando su superficie al momento de realizarse la mezcla (BREM S.A.C., 2018).

### 2.2.7.1 Características Típicas del Aditivo.

Tiene forma líquida, es de color rojizo pálido, su punto de inflamación >90° (recipiente cerrado), punto de ebullición 200 °C, no es un producto explosivo, tiene una densidad de 1.04 g/ml, Viscosidad (25 °C) 100-500 cps, en una disolución al 10 % presenta un PH neutro o ligeramente ácido (BREM S.A.C., 2018).

**Dosificación del Aditivo.** La dosificación del aditivo se emplea de acuerdo a la cantidad de suelo, su peso unitario suelto y a la humedad natural. De acuerdo a la siguiente ecuación:

#### Ecuación 11

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho$$

Donde:

*T*: cantidad de terrasil por muestra en *g*

*Q*: cantidad de muestra en *g*

*PUS*: peso unitario suelto en *kg/m<sup>3</sup>*

*D*: dosificación de Terrasil *l/m<sup>3</sup>*

*ρ*: densidad del agua en *kg/m<sup>3</sup>*

Además, Terrasil indica en su ficha técnica (Anexo D) una dosificación referencial.

#### Ventajas

1. Como es un producto líquido su aplicación es más práctica y fácil de usar.
2. El suelo tratado consigue características hidrófobas de forma permanente.
3. El suelo mantiene la transpiración (expulsa el agua en forma de vapor).

## **Desventajas**

1. El producto es reactivo a la humedad. La exposición excesiva a la humedad puede conducir a un aumento de la viscosidad y gelificación.
2. No se puede almacenar el producto luego de realizar la dilución con el agua.

### **2.2.7.2 Medidas de Uso, Cuidado y Almacenamiento.**

La Solución de 1 ml de Terrasil y 10 ml de agua, o la mezcla con la cual se realiza el diseño siempre el resultado debe ser una solución transparente, sino fuera el caso, salga blanquecina por ejemplo, no proceder al uso del aditivo (BREM S.A.C., 2018).

El producto debe ser usado en un lugar ventilado, debe ser almacenado en lugares alejados del calor, bien ventilados alejado de materiales oxidantes o materiales incompatibles.

#### **Presentación**

La presentación del producto es en bidones de 20 kg.

**Identificación de la Sustancia y de la Empresa.** El producto cuenta con la conformidad del reglamento OSHA y el reglamento europeo estándar.

Nombre del producto: Terrasil

Compañía: Zydex Industries

## **2.3 Definición de términos básicos**

**Suelos arcillosos.** Es aquel tipo de suelo que está conformado por partículas menores de 0.002 mm, considerados como suelos cohesivos que al contacto con el agua desarrollan plasticidad.

**Estabilización de suelos.** Es el proceso que consiste en dotar mejoras a las propiedades del suelo, mostrando permanencia en el tiempo, siguiendo diferentes mecanismos y terminando en un proceso de compactación.

**Aditivo.** Es un producto químico, natural o sintético, que por su acción y/o combinación con el suelo, modifica una o más propiedades de comportamiento.

**Terrasil.** Es un aditivo de composición mineralógica capaz de generar cambios en las propiedades de un suelo.



**Índice de plasticidad.** Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, es una referencia respecto al grado de plasticidad que representa un suelo.

**Compactación.** La compactación es la densificación de los suelos por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica.

**Parámetros de compactación.** Los parámetros de compactación son indicadores que reflejan el estado de un suelo compactado. Donde, para llegar a una densidad seca máxima es necesario un contenido de humedad óptimo.



## **3.2 Equipos, herramientas, materiales e insumos**

### **3.2.1 Equipos y herramientas**

- Balanza de 0,1 gr hasta 20 kg
- Balanza 0,01 gr de precisión con capacidad de hasta 3000 g.
- Horno con control de temperatura
- Equipo completo de compactación Proctor modificado de 4"
- Enrasador metálico
- Juego de tamices N°4,10,20,40,60,100, 140, 200
- Barra lisa de 5/8"
- Copa Casagrande, ranurador
- Placa de vidrio esmerilado
- Taras y recipientes de distinto tamaño

### **3.2.2 Materiales e insumos**

- ✓ Suelo arcilloso de baja plasticidad
- ✓ Aditivo Terrasil
- ✓ Agua destilada
- ✓ Agua potable

## **3.3 Metodología y desarrollo de la investigación.**

El aditivo Terrasil se obtuvo de la empresa BREM S.A.C. quién recomendó las proporciones a utilizar.

Se inició la investigación con la recolección de la muestra de suelo arcilloso en la lotización santa María que pertenece al sector Huacariz- Cajamarca. Para lo cual se realizaron tres calicatas.

Se realizó los ensayos de contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, granulometría por lavado y con los resultados se clasificó el suelo mediante los sistemas SUCS y AASHTO.

Se hizo el ensayo de peso unitario seco. Se ejecutó el ensayo Proctor modificado de la muestra patrón y de las muestras con adición de 0.50 l/m<sup>3</sup>, 1.00 l/m<sup>3</sup> y 1.50 l/m<sup>3</sup> de Terrasil, obteniéndose la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad.

Se realizaron los ensayos de límites de plasticidad adicionando Terrasil con las cantidades de: 0.50 l/m<sup>3</sup>, 1.00 l/m<sup>3</sup> y 1.50 l/m<sup>3</sup> y se obtuvo la variación en el índice de plasticidad.

El procesamiento de los datos de los ensayos se ha realizado mediante el uso del programa de office Excel 2018, los cuales se analizaron mediante gráficos y tablas.

### **3.4 Población y muestra**

#### **3.4.1 Población**

La población de estudio en esta investigación estuvo dada por los suelos arcillosos de baja plasticidad (CL), del sector Huacariz de la ciudad de Cajamarca.

#### **3.4.2 Muestra**

La muestra estuvo constituida por 60 especímenes de suelo arcilloso CL, de 1 800 a 2 000 gr cada una, estas a la vez representan a 12 muestras ensayas mediante Proctor Modificado. Los 5 especímenes por muestra estuvieron definidos por el contenido de humedad y también mezcladas con variadas proporciones de aditivo.

Para la extracción se ha realizado previa inspección del lugar y con referencias de estudios ya realizados anteriormente por el laboratorio de suelos donde son localizados los suelos arcillosos, los datos donde se ha obtenido las muestras se detalla en la Tabla 7.

**Tabla 7***Datos de ubicación de la extracción de la muestra*

<b>UBICACIÓN DE LAS CALICATAS</b>			
<b>Calicata</b>	<b>Lugar</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Coordenadas GMS</b>
C1	Lot. Santa María Calle El Pijayo	1,70 – 1,80 m	Latitud: 7°10'40.8" S Longitud: 78°29'11.1" W
C2	Lot. Santa María Calle La Marupa	1,90 – 2,10 m	Latitud: 7°10'41.0" S Longitud: 78°29'07.7" W
C3	Villa Huacariz	1,40 – 1,50 m	Latitud: 7°10'44.3" S Longitud: 78°28'44.8" W

Nota. La tabla muestra los puntos de extracción de las muestras de suelo.

A continuación, se muestra la Tabla 8 con las abreviaturas utilizadas para poder identificar las 12 muestras.

**Tabla 8***Denominación de los especímenes de la muestra que se analizaron*

<b>N° CALICATAS</b>	<b>MUESTRA DE ARCILLA (CL)</b>	<b>MUESTRAS DE ARCILLA CON TERRASIL</b>		
		<b>Mezcla A (0.50 lt/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Mezcla B (1.00 lt/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Mezcla C (1.50 lt/m<sup>3</sup>)</b>
<b>C1</b>	M-1	MTX-1	MTY-1	MTZ-1
<b>C2</b>	M-2	MTX-2	MTY-2	MTZ-2
<b>C3</b>	M-3	MTX-3	MTY-3	MTZ-3

Nota: En la tabla se muestran las abreviaturas de las 12 muestras que se utilizaron en el desarrollo de esta investigación.

### **3.5 Procedimiento de ensayos de laboratorio**

#### **3.5.1 Determinación del contenido de humedad**

Para el desarrollo del ensayo se aplicó la norma ASTM D2216

### **3.5.2 Análisis granulométrico método de lavado**

Este se ha realizado aplicando la norma, ASTM D 422, sin embargo, en esta investigación por el tipo de suelo que se ha utilizado solamente los tamices N° 4, 10,20,40,60,100, 140, 200.

### **3.5.3 Determinación de límite líquido**

Para realizar el ensayo se ha aplicado la norma ASTM D 4318-05.

#### **Cálculos**

Se continuó con los cálculos usando la ecuación 3.

#### **Elaboración de la curva de flujo**

La curva de fluidez o curva de flujo se realizó con los puntos de los pares entre el contenido de humedad (%) y el número de golpes, en un gráfico semilogarítmico. Se determinó el límite líquido (LL) de la muestra, el cual es el contenido de humedad correspondiente a los 25 golpes.

### **3.5.4 Determinación de límite plástico**

Para realizar el ensayo se ha procedido aplicando la norma ASTM D 4318.

#### **Cálculos**

Los cálculos para determinar el límite plástico se realizaron usando la ecuación luego se realizó el cálculo del índice de plasticidad (IP) utilizando la ecuación 7.

### **3.5.5 Clasificación de suelos**

#### **a) Clasificación del Suelo (SUCS)**

Después que se obtuvo el índice de plasticidad (IP) se procedió a realizar la clasificación del suelo, usando el Cuadro de Clasificación de Suelo (Anexo A) y la carta de plasticidad de Casagrande (Figura 3) siguiendo el uso de la norma NTP 339 134 1999.

## b) Clasificación del Suelo Mediante sistema AASHTO

Con los resultados de los ensayos y con el cálculo del índice de grupo con las ecuaciones 9 y 10 se procede a realizar la clasificación del suelo mediante la tabla AASHTO (Anexo B).

### 3.5.6 Ensayo proctor modificado

El proceso se ha realizado según la norma ASTM D1557, por la naturaleza del tipo de suelo usado en esta investigación se ha utilizado el método A. Se hizo la compactación de todas las muestras según están señaladas en la Tabla 8.

#### Cálculos

Los cálculos se realizaron mediante las siguientes ecuaciones.

Cálculo de la densidad húmeda

$$\rho_h = \frac{(M_t - M_{hd})}{1000 * V} \dots\dots\dots \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$\rho_h$  = densidad húmeda del espécimen compactado (kg/m<sup>3</sup>)

$M_t$  = masa del espécimen húmedo y molde (kg)

$M_{hd}$  = masa del molde de compactación (kg)

$V$  = volumen del molde de compactación (m<sup>3</sup>)

#### Cálculo de la densidad seca (ecuación 7 o ecuación 10)

$$\rho_s = \frac{\rho_h}{1 + \frac{W}{100}}$$

Donde:

$\rho_s$  = densidad seca del espécimen compactado (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_h$  = densidad húmeda del espécimen compactado (kg/m<sup>3</sup>)

$W$  = contenido de agua (%)

### 3.5.7 Ensayo de peso unitario

El procedimiento del ensayo se ha realizado aplicando la norma NTP 400.017.199

### **Cálculos**

Los cálculos se procedieron mediante la ecuación 6

## **3.6 Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados**

Los resultados se presentan de acuerdo a los ensayos de laboratorio realizados, como las muestras han sido obtenidas de 3 calicatas (C1, C2, C3) se presentan los resultados de los ensayos realizados por cada calicata, después se presentan los resultados de las mezclas con el aditivo Terrasil, también se hicieron gráficos comparativos entre las muestras patrón y los resultados de las mezclas con las diferentes dosificaciones de aditivo Terrasil.

### **3.6.1 Propiedades físicas del suelo**

#### **A. Contenido de humedad**

**Tabla 9**

*Contenido de humedad para las muestras de las calicatas*

<b>Muestra</b>	<b>Contenido de humedad (%)</b>
C1	18,70
C2	9,54
C3	13,98

En la tabla, los resultados en porcentajes representan el contenido de humedad para las muestras de cada calicata.



## B) Peso Unitario Suelto Seco

**Tabla 10**

*Peso unitario seco de las muestras*

Muestra	Peso unitario suelto seco	
	(kg/cm <sup>3</sup> )	
C1	1 153,29	
C2	1 337,73	
C3	1 259,29	

La tabla muestra el resultado del peso unitario suelto para cada calicata

## C) Análisis granulométrico

**Tabla 11**

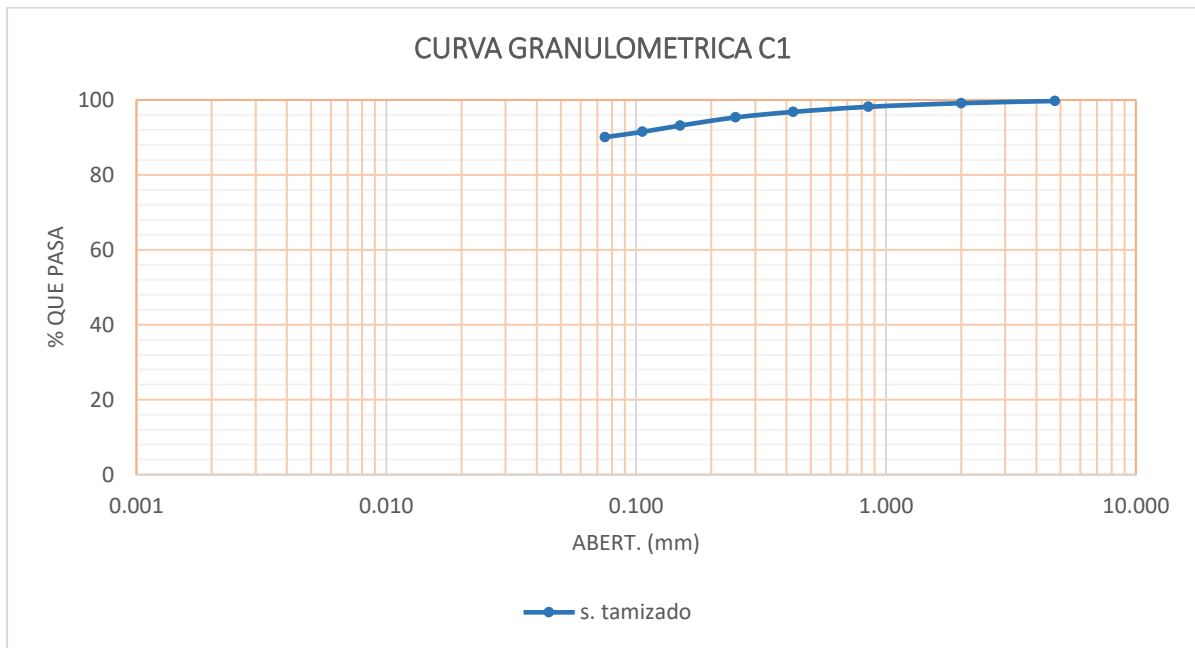
*Análisis granulométrico de la muestra C1.*

N°	TAMIZ	% PASA
	ABERT. (mm)	
4	4.750	99.73
10	2.000	99.14
20	0.850	98.16
40	0.425	96.80
60	0.250	95.33
100	0.150	93.16
140	0.106	91.48
200	0.075	90.07
Cazoleta	0.000	0

La tabla presenta el resultado del tamizaje luego de realizarse el lavado de la muestra.

**Figura 5**

*Curva granulométrica de la muestra C1*



La figura muestra la granulometría del suelo tamizado.

Según los resultados que se tiene en la Tabla 11, más del 90 % de suelo pasa el tamiz N° 200 lo que indica que el suelo de C1 es un suelo fino.

**Tabla 12**

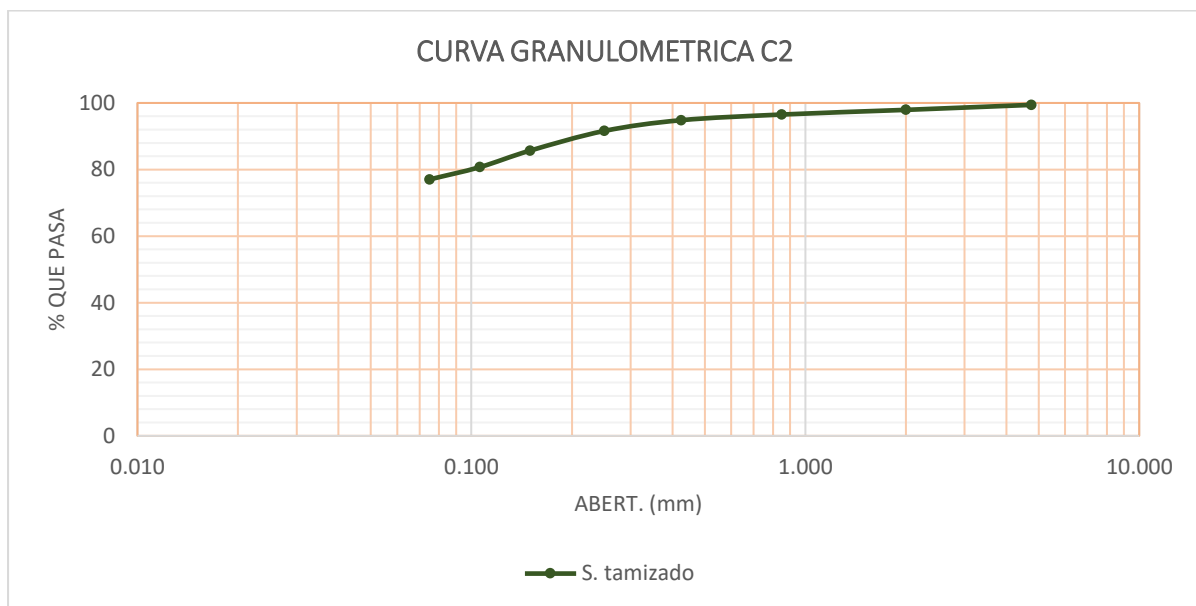
*Análisis granulométrico de la muestra C2*

TAMIZ		% PASA
N°	ABERT. (mm)	
4	4.750	99.42
10	2.000	97.92
20	0.850	96.52
40	0.425	94.82
60	0.250	91.59
100	0.150	85.69
140	0.106	80.73
200	0.075	77.04
Cazoleta	0.000	0

Los datos de la tabla muestran los resultados del porcentaje de suelo que pasa los tamices después de realizarse el lavado.

**Figura 6**

*Curva granulométrica de la muestra C2*



*Nota.* La gráfica en escala semilogarítmico muestra la distribución del porcentaje de suelo que pasa cada tamiz después del lavado.

De acuerdo con los datos obtenidos en el análisis granulométrico de la Tabla 12, el 77 % del suelo ha pasado el tamiz N°200, lo cual refleja que es un suelo fino.

**Tabla 13**

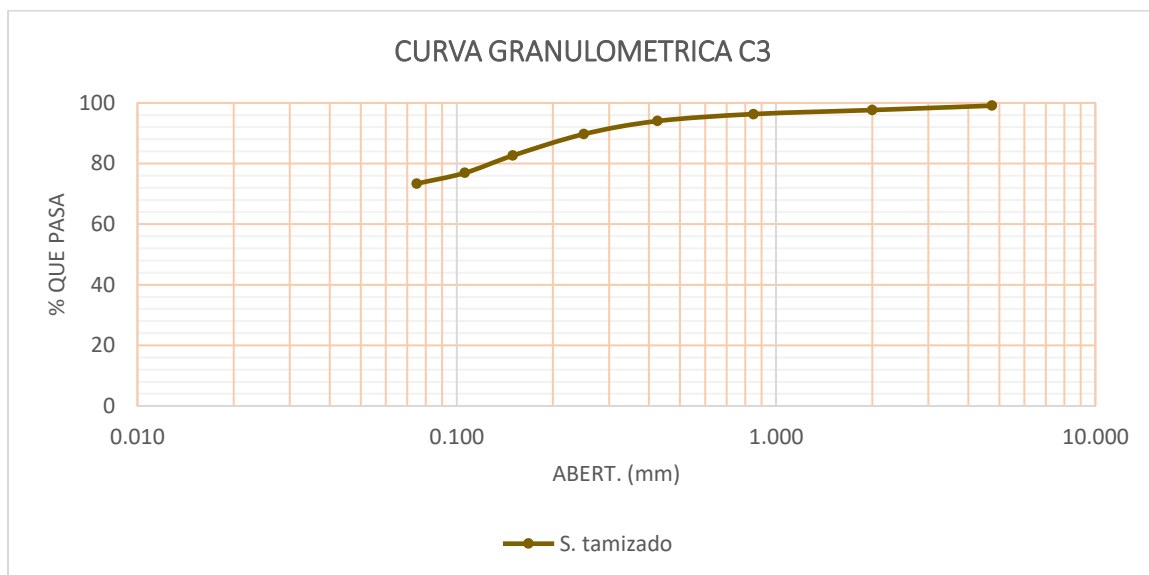
*Análisis granulométrico de la muestra C3*

TAMIZ		% PASA
N°	ABERT. (mm)	
4	4.750	99.10
10	2.000	97.66
20	0.850	96.32
40	0.425	94.02
60	0.250	89.72
100	0.150	82.66
140	0.106	76.91
200	0.075	73.39
Cazoleta		0

Los resultados presentados reflejan los porcentajes de suelo que pasa cada tamiz después del lavado.

**Figura 7**

*Curva granulométrica de la muestra C3*



La gráfica en escala semilogarítmico representa el porcentaje de suelo que pasa cada tamiz después del lavado.

Según los resultados obtenidos en el análisis granulométrico de la Tabla 13 el 73 % del suelo ha pasado el tamiz N°200, lo cual nos indica que la muestra de la C3 también es un suelo fino.

#### **D) Límites de plasticidad**

**Tabla 14**

*Límites de Atterberg del suelo*

<b>Muestra de suelo</b>	<b>Límite líquido LL (%)</b>	<b>Límite plástico LP (%)</b>	<b>Índice de plasticidad IP (%)</b>
C1	45	27	18
C2	30	18	12
C3	30	17	13

De los resultados que se han obtenido en los ensayos de plasticidad de las tres calicatas, el índice de plasticidad se encuentra en el rango de suelos arcillosos según la información de la Tabla 4.

**Tabla 15***Límites de Atterberg del suelo adicionando Terrasil*

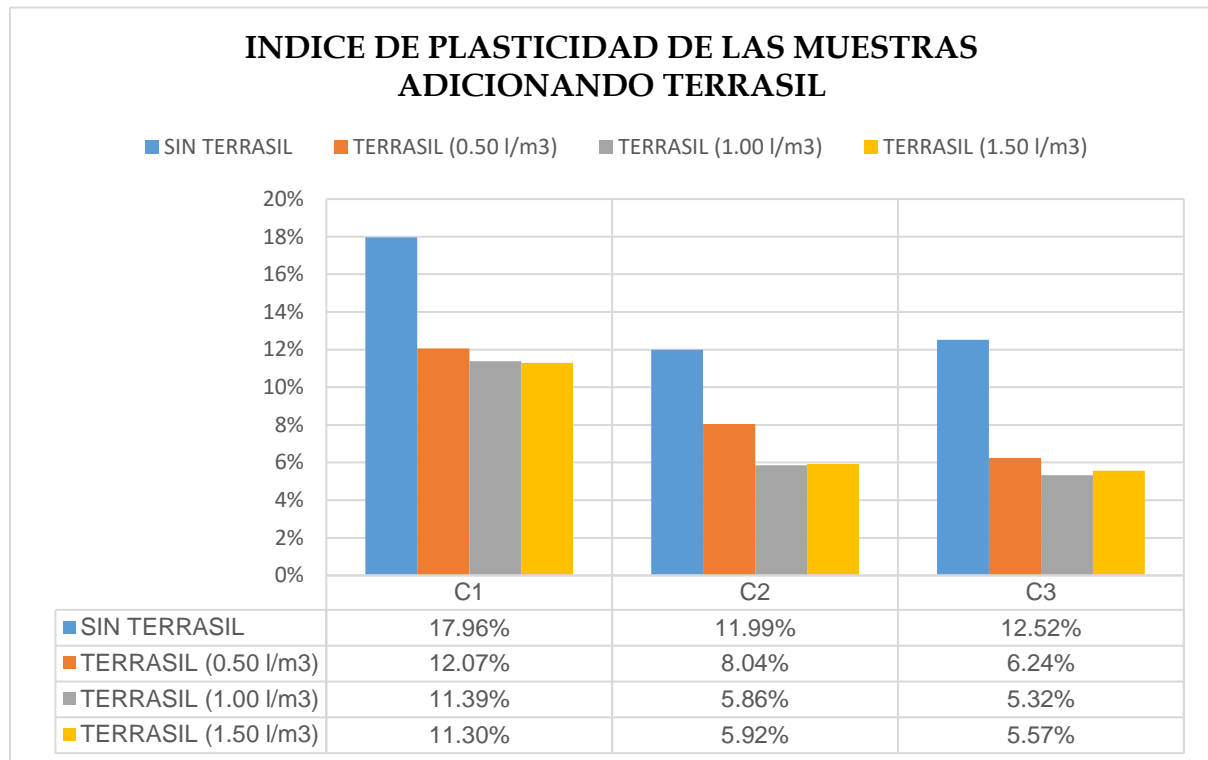
<b>Muestra de suelo</b>		<b>Límite Líquido LL (%)</b>	<b>Límite Plástico LP (%)</b>	<b>Índice de plasticidad IP (%)</b>
C1	Terrasil ( 0,50 l/m <sup>3</sup> )	45	33	12
	Terrasil (1,00 l/m <sup>3</sup> )	47	36	11
	Terrasil ( 1,50 l/m <sup>3</sup> )	46	35	11
C2	Terrasil ( 0,50 l/m <sup>3</sup> )	32	24	8
	Terrasil (1,00 l/m <sup>3</sup> )	31	25	6
	Terrasil ( 1,50 l/m <sup>3</sup> )	30	24	6
C3	Terrasil ( 0,50 l/m <sup>3</sup> )	25	18	7
	Terrasil (1,00 l/m <sup>3</sup> )	25	19	6
	Terrasil ( 1,50 l/m <sup>3</sup> )	24	19	5

En la tabla se muestran los resultados de los ensayos de Límites de Atterberg de las muestras patrón y de las muestras adicionando el aditivo con las dosificaciones de acuerdo a los planteado en esta investigación, haciendo un total de 18 muestras tanto para límite líquido y límite plástico.

Según los resultados se determina que hay variación en el IP al agregar el aditivo Terrasil a las 3 muestras C1, C2, C3, respecto de las muestras analizadas sin aditivo. Con el aditivo el IP de todas las muestran disminuyen hasta en 50% de su valor en estado natural. La figura 10 denota la variación del IP representado en barras.

**Figura 8**

*Índice de plasticidad del suelo con el aditivo Terrasil*



En la figura se muestra para la muestra C1 la mayor variación del IP es con Terrasil al 1,50 l/m<sup>3</sup> con 11,30 %; para la muestra C2 es con Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup> con 5,86 % y para la muestra C3 con Terrasil al 1,50 l/m<sup>3</sup> con 5, 32 %, respectivamente.

### **E) Clasificación del suelo según SUCS (ASTM D2487-11)**

Los datos de IP y LL se ingresaron en el Cuadro de plasticidad o Carta de Casagrande para suelos finos y orgánicos (Figura 3) (Apéndice A(f)), quedando clasificado las muestras de suelo como arcilloso de baja plasticidad CL o como también se indica en la norma ASTM D2487-11 en el ítem 11.1.1 como *arcilla magra* Cl.

## F) Clasificación del suelo mediante método AASHTO.

**Tabla 16**

*Clasificación del suelo mediante AASHTO*

<b>Calicata</b>	<b>IG</b>	<b>Clasificación AASHTO</b>
C1	18	A-7-6
C2	8	A-6
C3	8	A-6

Según la clasificación de AASHTO y lo que indica la Tabla 6, índice de grupo (IG) indica que el suelo de la calicata C1 es un suelo muy pobre y los suelos de las calicatas C3 y C2 son suelo pobre.

Por tanto, las muestras de suelo de las calicatas C1, C2, C3, queda definido como están detallados en la Tabla 17.

**Tabla 17**

*Clasificación del suelo*

<b>Suelo</b>	<b>ID muestra</b>	<b>Clasificación según SUCS</b>	<b>Clasificación método AASHTO</b>
C1	M-1	CL	A-7-6(18)
C2	M-2	CL	A-6(8)
C3	M-3	CL	A-6(8)

Las muestras de suelo arcilloso de baja plasticidad de las calicatas C1, C2, C3, serán consideradas como muestra de suelo arcilloso CL, M-1, M-2, M-3, respectivamente como se detalla en la Tabla 8.

### **3.6.2 Parámetros de compactación del suelo**

Mediante el ensayo de proctor modificado se obtuvo los parámetros de compactación, densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad para las muestras patrón M-1, M-2 y M-3, estos datos obtenidos reflejan las características del

suelo arcilloso de baja plasticidad en condiciones normales reales. Resultados que se resumen en la Tabla 18.

**Tabla 18**

*Parámetros de compactación de muestras patrón*

<b>Muestra</b>	<b>Contenido óptimo de humedad (%)</b>	<b>Densidad seca máxima (<math>g/cm^3</math>)</b>
M-1	20,7	1,610
M-2	14,5	1,863
M-3	12,5	1,906

### **3.6.3 Dosificación de aditivo aplicado al suelo**

Para realizar el ensayo de proctor modificado con la adición del aditivo Terrasil, primeramente, se hicieron los cálculos mediante la ecuación 11 en las hojas de cálculo detallados en el Apéndice C.

**Tabla 19**

*Dosificación de mezcla suelo - Terrasil para la muestra M-1*

<b>ID</b>	<b>DOSIFICACION</b>	<b>M-1</b>		
		<b>CANT.(g)</b>	<b>PUSS(kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>TERRASIL (g)</b>
MTX-1	(0,50 l/m <sup>3</sup> )	2 000	1 153,00	0,87
MTY-1	(1,00 l/m <sup>3</sup> )	2 000	1 153,00	1,73
MTZ-1	(1,50 l/m <sup>3</sup> )	1 800	1 153,00	2,34

La tabla indica la cantidad de aditivo utilizada en cada muestra de acuerdo a la cantidad de muestra y el Peso unitario suelto seco (PUSS).



**Tabla 20***Dosificación de mezcla suelo- Terrasil para la muestra M-2*

ID	DOSIFICACION	M-2		
		CANT.(gr)	PUSS(kg/m <sup>3</sup> )	TERRASIL (g)
MTX-2	(0,50 l/m <sup>3</sup> )	2 000	1 338	0,75
MTY-2	(1,00 l/m <sup>3</sup> )	2 000	1 338	1,49
MTZ-2	(1,50 l/m <sup>3</sup> )	2 000	1 338	2,24

**Tabla 21***Dosificación de mezcla suelo-Terrasil para la muestra M-3*

ID	DOSIFICACION	M-3		
		CANT.(gr)	PUSS(kg/m <sup>3</sup> )	TERRASIL (g)
MTX-3	(0,50 l/m <sup>3</sup> )	2 000	1 260	0,79
MTY-3	(1,00 l/m <sup>3</sup> )	2 000	1 260	1,59
MTZ-3	(1,50 l/m <sup>3</sup> )	2 000	1 260	2,38

Con la cantidad de Terrasil de la Tabla 19, 20, 21 se realizaron los ensayos de compactación de las 9 muestras.

### 3.6.4 Parámetros de compactación del suelo - Terrasil

Los resultados reflejan la acción del aditivo Terrasil en las muestras de suelo arcilloso CL, expresando una variación en cada una.

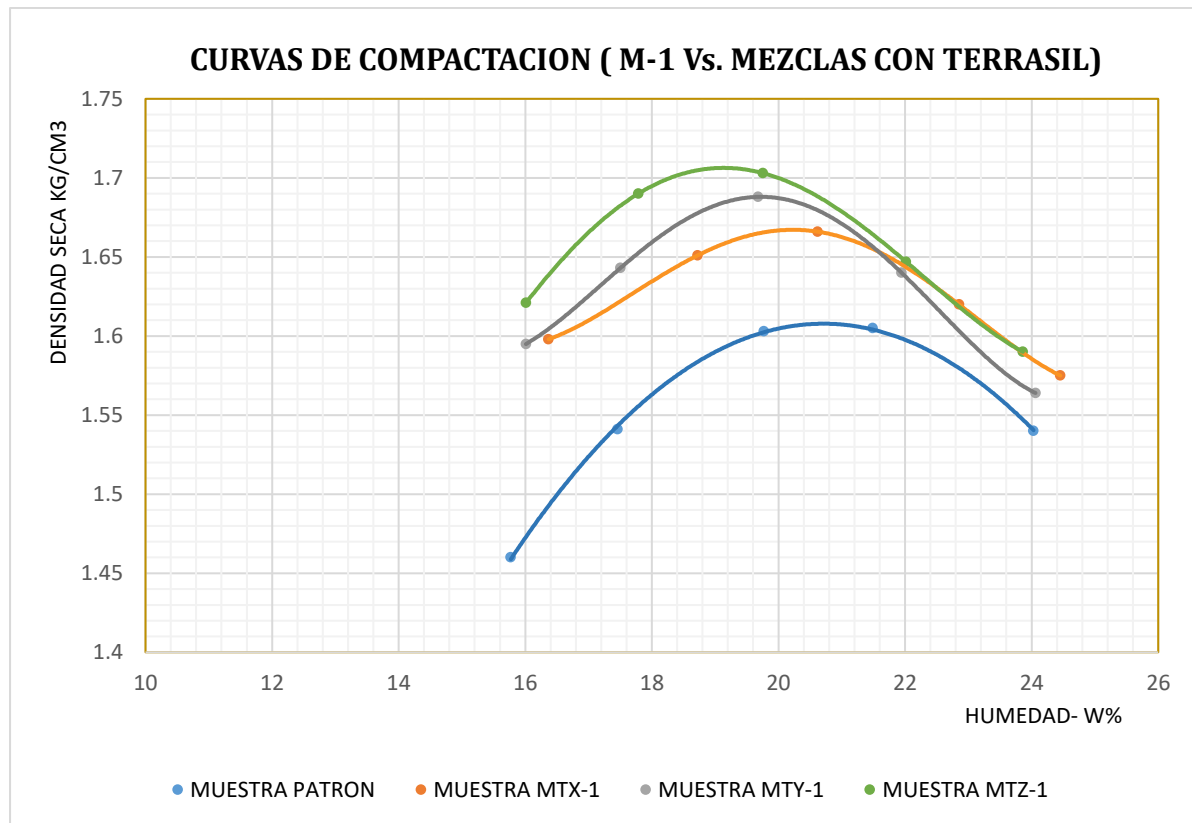
**Tabla 22***Parámetros de compactación de la muestra M-1 y Terrasil*

Parámetros de compactación	Muestra de arcilla	Muestra de arcilla con Terrasil		
		Mezcla (0,50 l/m <sup>3</sup> )	Mezcla (1,00 l/m <sup>3</sup> )	Mezcla (1,50 l/m <sup>3</sup> )
	M-1	MTX-1	MTY-1	MTZ-1
Densidad seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,610	1,667	1,688	1,707
Contenido óptimo de humedad (W%)	20,7	20,2	19,8	19,1

La tabla muestra los resultados del ensayo proctor modificado de la muestra arcillosa M-1 y las mezclas con el aditivo Terrasil.

**Figura 9**

*Curvas de compactación M-1 y mezclas con Terrasil*



El gráfico muestra la variación de la curva de compactación del suelo arcilloso M-1 y las mezclas con dosificación de Terrasil.

**Tabla 23**

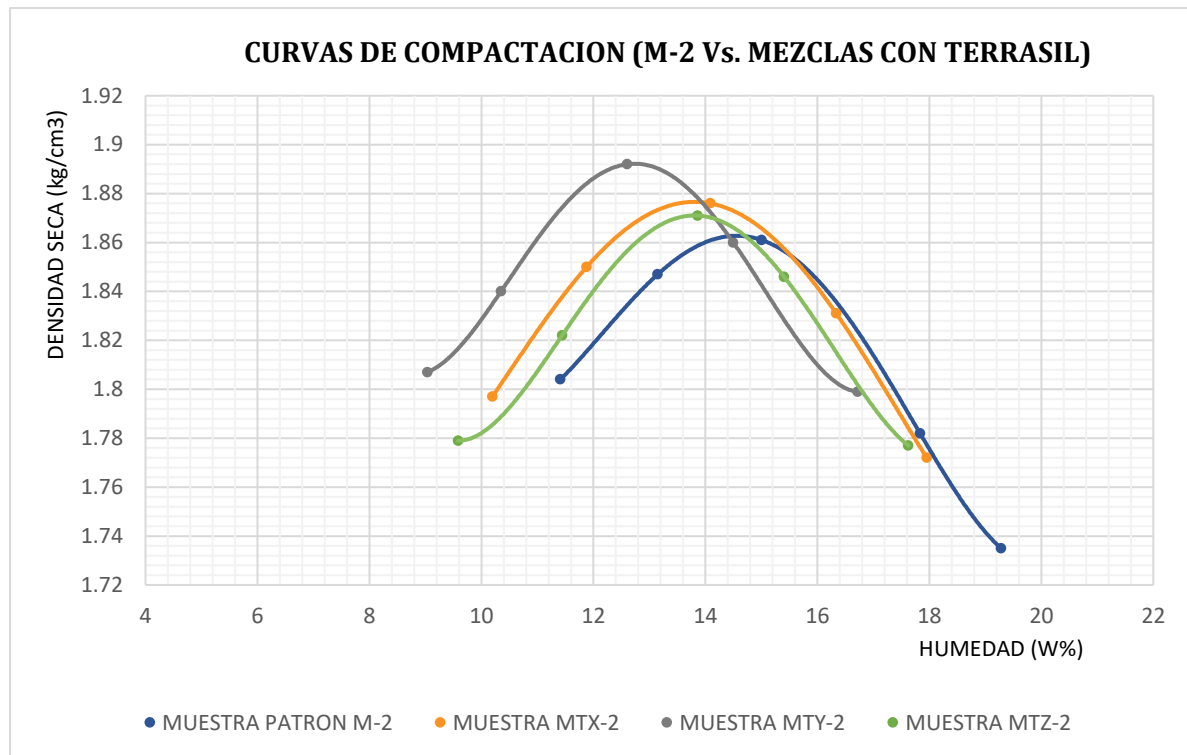
*Parámetros de compactación de la muestra M-2 y Terrasil*

Parámetros de compactación	Muestra de arcilla	Muestra de arcilla con Terrasil		
		Mezcla (0,50 l/m³)	Mezcla (1,00 l/m³)	Mezcla (1,50 l/m³)
	M-2	MTX-2	MTY-2	MTZ-2
Densidad seca máxima (g/cm³)	1,863	1,877	1,892	1,871
Contenido óptimo de humedad (W%)	14,5	13,8	12,8	13,8

La tabla muestra los resultados del ensayo Proctor Modificado de la muestra arcillosa M-2 y las mezclas con el aditivo Terrasil.

**Figura 10**

*Curvas de compactación M-2 y mezclas con Terrasil*



En el gráfico se muestra la variación de la curva de compactación del suelo arcilloso M-2 y las mezclas con dosificación de Terrasil.

**Tabla 24**

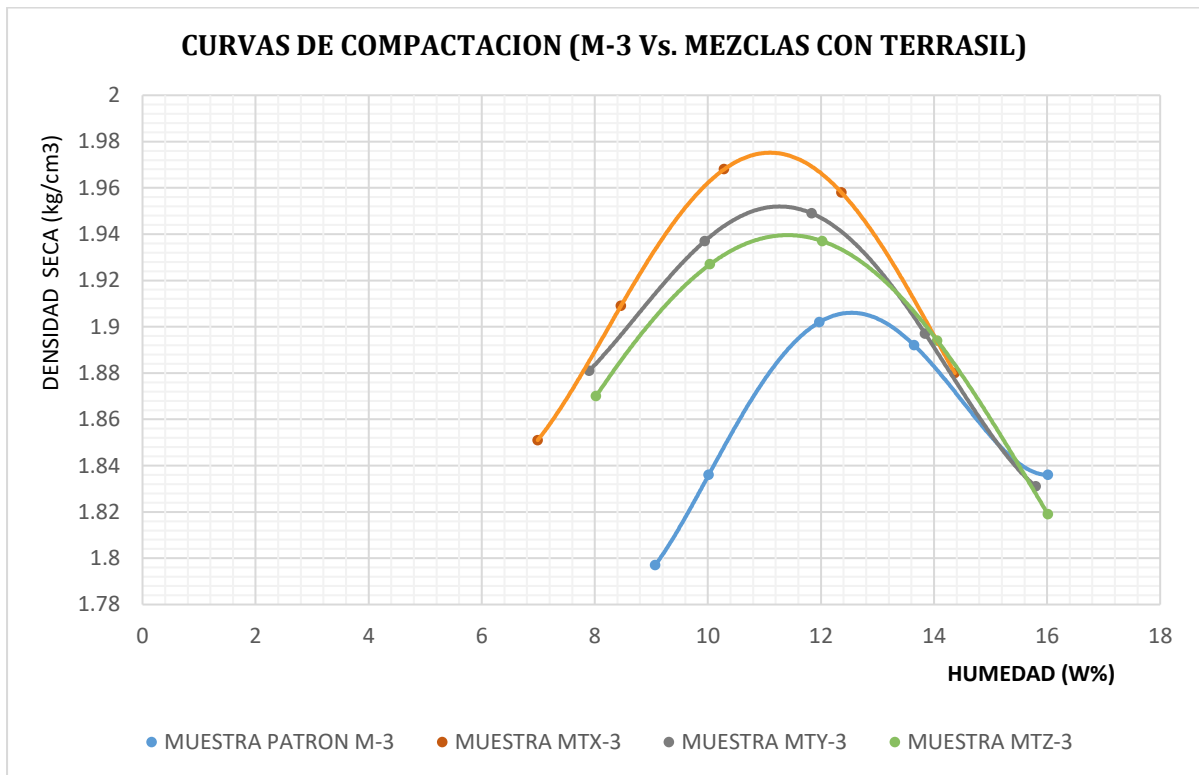
*Parámetros de compactación de la muestra M-3 y Terrasil*

Parámetros de compactación	Muestra de arcilla	Muestra de arcilla con Terrasil		
		Mezcla (0,50 l/m³)	Mezcla (1,00 l/m³)	Mezcla (1,50 l/m³)
	M-3	MTX-3	MTY-3	MTZ-3
Densidad seca máxima (g/cm³)	1,906	1,976	1,952	1,940
Contenido óptimo de humedad (W%)	12,5	11,1	11,3	11,5

La tabla muestra los resultados del ensayo proctor modificado de la muestra arcillosa M-3 y las mezclas con el aditivo Terrasil.

**Figura 11**

*Curvas de compactación M-3 y mezclas con Terrasil*



En el gráfico se muestra la variación de la curva de compactación del suelo arcilloso M-3 y las mezclas con aditivo Terrasil.

## CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

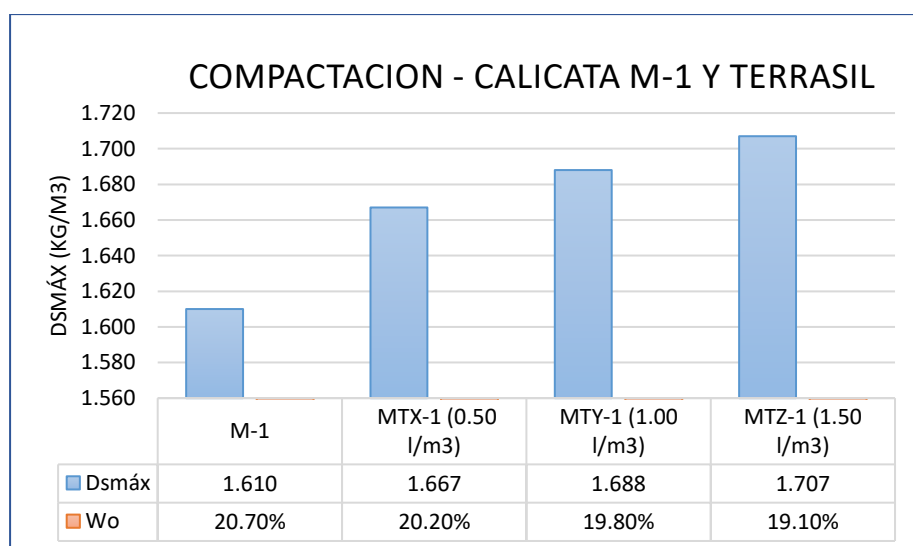
### 1.1 Análisis de los resultados

#### a) Muestra de suelo arcilloso M-1

Según los resultados de los ensayos para M-1 se trata de un suelo arcilloso de baja plasticidad pero que respecto a las muestras de M-2 y M-3 su IP es más alto, por tanto, es un suelo que requiere una mayor dosificación de aditivo para obtener una mayor variación en sus parámetros de compactación. Esto se refleja en la Figura 12, donde la mayor variación que alcanza el suelo es con la mezcla MTZ-1 (1,50 l/m<sup>3</sup>).

**Figura 12**

*Parámetros de compactación de la muestra M-1*



La Figura muestra la variación de los parámetros de compactación de la muestra M-1 al adicionar el aditivo Terrasil.

De igual manera ocurre con el IP, este alcanza una mayor disminución con la dosificación de Terrasil al 1,50 l/m<sup>3</sup> variando en 6,70 % respecto a la muestra patrón lo cual representa una disminución de 37,2 %, reduciendo el intervalo del rango de plasticidad del suelo arcilloso de baja plasticidad y modificando las propiedades del mismo.

## **b) Muestra M-2 y M-3**

Para la muestra M-2 la acción de aditivo varia, ya que es un suelo arcilloso CL con IP menor respecto al IP de la muestra M-1, y el mayor incremento de la densidad seca máxima se obtiene con la mezcla MTY-2 (1,00 l/m<sup>3</sup>) como se puede apreciar en la Figura 13, y según el análisis granulométrico es un suelo que el 70 % de sus partículas pasa la malla N° 200 a diferencia del suelo de la muestra M-1, del cual, el 90 % de sus partículas pasan la malla N°200.

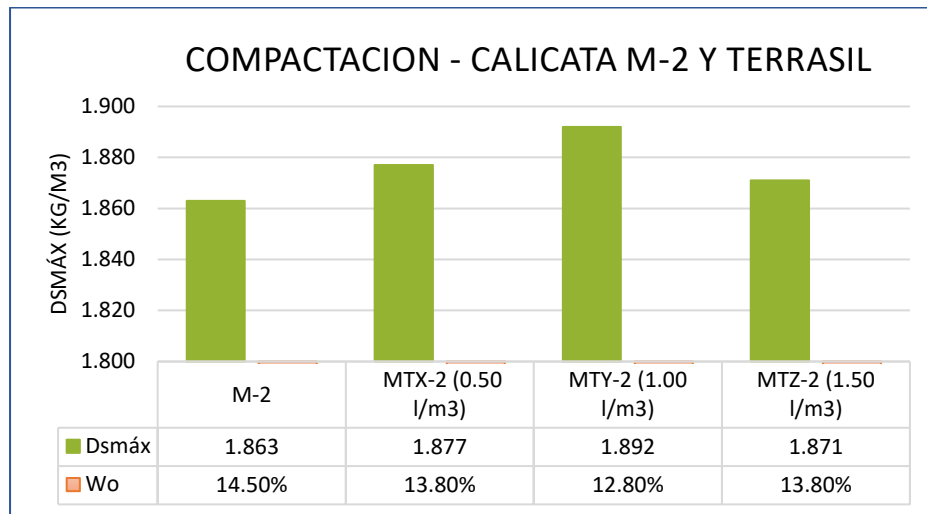
La muestra M-3, con características parecidas al suelo arcilloso CL de M-2, alcanza una mayor variación en sus parámetros de compactación respecto las muestras M-1 y M-2 con una dosificación menor, este suelo M-3 incrementa su densidad seca máxima en un 3,7 % con la mezcla MTX-3 (0,50 l/m<sup>3</sup>) y disminuye su contenido óptimo de humedad en 1,4 %.

Las variaciones de los parámetros de compactación de la muestra M-3 según sus resultados se detalla en la Figura 14.

Respecto al IP del suelo arcillosos de baja plasticidad de las calicatas C2 y C3 también se genera una reducción al adicionar el aditivo Terrasil, tal como se muestra en la Figura 8, la M-2 alcanza una variación de 6,14 % con la dosificación de 1,00 l/m<sup>3</sup> y la M-3 alcanza una mayor reducción de 7,68 % con la muestra 1,00 l/m<sup>3</sup>, la característica impermeabilizante del aditivo Terrasil ha generado un incremento en el límite líquido de las calicatas C1 y C2, una reducción del límite líquido en la calicata C3 y un incremento en el límite plástico de las 3 calicatas, según se muestran los resultados de la muestra M-3 en la Tabla 15 es la que presenta los resultados positivos ante la adición del Terrasil en el ensayo de los límites de Atterberg.

**Figura 13**

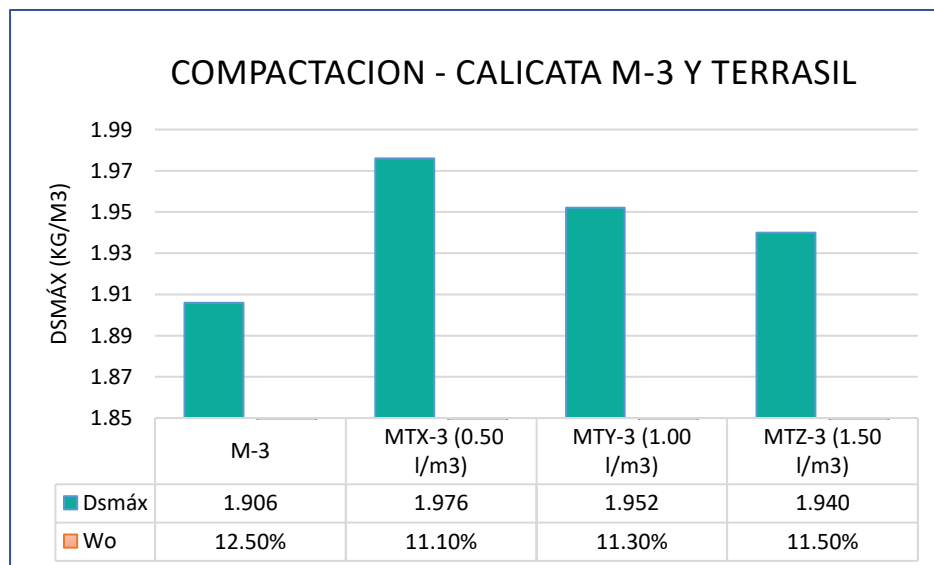
*Parámetros de compactación de la muestra M-2*



La Figura muestra la variación de los parámetros de compactación de la muestra M-2 al adicionar el aditivo Terrasil.

**Figura 14**

*Parámetros de compactación de la muestra M-3*



La Figura muestra la variación de los parámetros de compactación de la muestra M-3 al adicionar el aditivo Terrasil.

El aditivo Terrasil ha generado mayor incidencia en los suelos arcillosos CL con más del 90 % de partículas finas que pasan la malla N°200 debido a la acción de los silicatos y el grupo silanol presente en el aditivo.

En la muestra con alto porcentaje de partículas finas dentro de la composición de un suelo arcilloso de baja plasticidad la influencia el aditivo es mayor porque se genera una mezcla más homogénea y por tanto abarca una mayor superficie intersticial entre las partículas del suelo.

### c) Índice de Grupo

Considerando los nuevos valores del índice de plasticidad obtenidos luego de adicionarse el aditivo Terrasil en las tres muestras, es lógico que el índice de grupo va a variar de acuerdo a los nuevos resultados. En la tabla 25 se observa los nuevos valores.

**Tabla 25**

*Variación del índice de grupo (IG)*

Muestra	IG (suelo CL)	IG (Suelo CL + Terrasil)
M-1	18	13
M-2	8	4
M-3	8	2

Los nuevos resultados obtenidos en el índice de grupo se contrastan con la información de la Tabla 6 del MTC (2014), donde las muestras de suelo M-2, M-3 que se encuentran en el rango de *suelo pobre*, con el aditivo Terrasil se pasan a considerar en el rango de un *suelo regular*.

## 1.2 Discusión de los resultados

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación, se realiza las comparaciones con los resultados de otras investigaciones citados como antecedentes, primeramente, tenemos a Aswari S., Prasada Raju G., (2022) que tiene como resultado la reducción del contenido óptimo de humedad en 3%, el incremento de la densidad seca máxima en 4.3%, una reducción del límite líquido en 12.1% y del índice plástico en 4.5%, con la dosificación de Terrasil al 0.06% y fibra de coco al 0.06%, aplicado en suelos negros que tienen Índice de Plasticidad de 30.5%, entonces se reduce su IP hasta 16.46%, disminuyendo su índice de plasticidad e



incrementando su resistencia. Comparando con los resultados en esta investigación según se tiene en la Figura 10 y en las Tablas 24; 23; 22, se obtiene mayor variación en la muestra M-1, tanto en el IP como en los parámetros de compactación, por las características similares que tienen como en el alto contenido de partículas finas que pasan la malla N°200, corroborando de esta manera los resultados de esta investigación.

En el siguiente antecedente se tiene a Meeravali, K., Rubén, N., Rangaswamyb, K. (2020) la cual obtiene como resultado una reducción del IP de 9.67% al adicionar terrasil en 0.03% del peso de la muestra, haciendo el suelo menos plástico y que con la dosificación correcta del nanoquímico o Terrasil agregado al suelo arcilloso este lo vuelve más duro, comparando respecto a los resultados en esta investigación se tiene que la dosificación en porcentaje con la que se ha logrado mayor variación en el IP es mayor a los 0.03% , la dosificación en porcentaje respecto a la muestra de suelo seco de este trabajo es de 0.09% - 0.13%, sin embargo los resultados de Meeravali son refutados ya que la cantidad de aditivo utilizada esta en base al peso de la muestra, mientras que en la presente investigación la cantidad de aditivo utilizada está calculado en función al peso unitario suelto, humedad natural y dosis de terrasil dada en  $l/m^3$  , respecto a que el aditivo Terrasil lo vuelve más duro al suelo arcilloso, afirmando que el Terrasil genera una reacción química con las partículas del suelo, restringiendo la entrada de agua a la superficie endureciendo más el suelo esto se ha podido corroborar al momento de hacer este estudio ya que se han incrementado los valores en el límite líquido y en el límite plástico de las muestras M-1, M-2; a excepción de la muestra M-3 que se reduce el limite líquido y el limite plástico se ha mantenido; sucede que al generarse una reacción química del suelo- Terrasil impermeabiliza la superficie de las partículas y esto requiere de mayor humedad para pasar de un estado a otro, en cambio con el ensayo de proctor modificado se ha mejorado sus parámetros de compactación, llegando a alcanzar una elevación de la densidad seca máxima hasta en 6 % en una de las muestras. Sin embargo, tiene mucho que ver la composición mineralógica y las características del suelo en el valor de los resultados.

Como otro antecedente se tiene a Gonzales Zevallos, J.R. (2022) el cual en su investigación tiene como objetivo examinar las propiedades físico-mecánicas con el uso del Terrasil y Permazyme para la estabilización química para afirmado del camino

vecinal Santiago Pampa - Pampa Yanamayo, Sandia 2022, la muestra utilizada solamente el 8,95 % pasan la malla N° 200 y tienen un IP de 9,6 %, 9,4 % y 9,5 %, lo adiciona Terrasil en dosificaciones de 1 kg/m<sup>3</sup>, 1,5 kg/m<sup>3</sup> y 2 kg/m<sup>3</sup> obtiene un incremento de la densidad seca máxima en 2,3 % , una disminución del contenido óptimo de humedad en 0,91 % para la dosificación de 1,5 kg/m<sup>3</sup>, sus resultados muestran que la variación en sus parámetros de compactación es menor ya que se trata de una suelo con menor cantidad de partículas finas, también, sus resultados concuerdan con los resultados obtenidos en esta investigación , ya que la cantidad de Terrasil depende de sus propiedades para lograr un mejor resultado, sin embargo, los resultados pueden variar si se le adiciona mayor cantidad de aditivo tal como se puede ver que en algunas muestras a mayor cantidad de aditivo disminuye en el valor en sus parámetros de compactación de un suelo.

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1.1 Conclusiones

1. Con los resultados obtenidos en las muestras se concluye que el aditivo Terrasil influye de una manera positiva respecto a los parámetros de compactación de los suelos arcillosos CL evaluados en laboratorio, variando en los parámetros de compactación en cada muestra según se detalla : en la muestra M-1 con la mezcla MTZ-1 alcanza mayor variación, la densidad seca máxima se incrementó en 6,0 % y el contenido óptimo de humedad ha reducido en 1,6 %; en la muestra M-2 ha generado mayor influencia con la mezcla MTY-2, su densidad seca alcanza un incremento del 1,6 % y el contenido óptimo de humedad ha reducido en 1,7 %; en la muestra M-3 ha alcanzado mayor influencia con la dosificación de la mezcla MTX-3, la densidad seca máxima ha alcanzado una variación creciente del 3,7 % y una reducción del contenido óptimo de humedad en 1,4 %.
2. El índice de plasticidad de cada muestra al adicionar Terrasil ha disminuido, la M-1 alcanzó disminuir de 18 % a 11,30 % con la dosificación de Terrasil al 1,50 l/m<sup>3</sup>, la muestra M-2 alcanzó una disminución del IP de 12 % a 5,86 % con la dosificación de Terrasil al 1,00 l/m<sup>3</sup> y la M-3 obtuvo una disminución del IP de 13 % a 5,32 % con la cantidad de 1,00 l/m<sup>3</sup> de estabilizante Terrasil, haciendo las muestras de suelo CL menos plásticos.
3. El aditivo terrasil ha logrado incrementar la densidad seca máxima en las tres muestras (M-1, M-2, M-3) de suelos arcillosos CL, ha disminuido porcentualmente el contenido óptimo de humedad de las tres muestras y también se obtuvo una mayor incidencia en la densidad seca máxima en suelo arcilloso CL con mayor índice de plasticidad (IP), pero una baja variación en el contenido de humedad.

## 1.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un análisis del comportamiento del aditivo Terrasil al ser empleados en climas extremos y en zonas donde se tiene altas variaciones de temperatura.
- Realizar un proyecto de investigación para poder evaluar la influencia del aditivo Terrasil en la capacidad de soporte de suelos arcillosos de baja plasticidad, a través del ensayo California Bearing Ratio- CBR.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aldana, R. (29 de Abril de 2021). *Aula Carreteras*. Obtenido de Ensayos de Compactación- Proctor Normal y Proctor Modificado: <https://www.aulacarreteras.com/>
- Alva Hurtado, J. (2020). *Ingeniería Geotécnica*. Lima, Perú: Fondo Editorial EDUNI. Recuperado el febrero de 2022, de <https://www.jorgealvahurtado.com/files/LIBRO%20INGENIER%3%8DA%20GEOT%3%89CNICA%20ALVA%202020.pdf>
- ANCADE; ANTER; IECA. (2008). *MANUAL DE ESTABILIZACION DE SUELOS CON CEMENTO O CAL*. (IECA, Ed.) MADRID, ESPAÑA: Vaquero Servicios de Publicaciones,S.L. Recuperado el setiembre de 2021, de <http://www.anter.es>
- ASTM Internacional. (2010). Práctica Estandar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniera. *ASTM D2487-11*. Estados Unidos. Obtenido de <https://www.cesmec.cl>
- ASTM Internacional. (27 de diciembre de 2016). *ASTM D3282-15*. doi:10.1520/D3282-15
- Aswari, S. B., & Prasada Raju, G. R. (2022). Stabilizing Expansive Soil with Industrial Waste of Coir and Terrasil. *Earth and Environmental Science*. 1086, págs. 1-7. Kakinada, India: IOP Publishing Ltd. doi:DOI: 10.1088/1755-1315/1086/1/012020
- Bañón Blázquez, L., & Beviá García, J. F. (07 de April de 2015). *Manual de Carreteras. Volumen II: Construccion y Mantenimiento*. Obtenido de ResearchGate: <https://www.researchgate.net>
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. México: McGraw- Hill.
- CE.020, N. (2012). Suelos y Taludes. Perú. Recuperado el julio de 2021, de <http://www.ageecovias.net>
- CIUDAD UNIVERTISTARIA VIRTUAL DE SAN ISIDRO. (abril de 2016). *Ensayo Proctor de un suelo. Práctica virtual*. Recuperado el 2022, de [cuvs.com](https://www.cuvs.com): <https://www.cuvs.com/2016/04/ensayo-proctor-de-un-suelo-practica.html>
- Civilgeeks.com. (18 de Abril de 2011). [www.civilgeeks.com](http://www.civilgeeks.com). *Traducción de ASTM D4318*. Recuperado el Mayo de 2022, de <https://civilgeeks.com>

- Consulting, A.-G. (2022). *Geotecnia y Mecánica de suelos*. Obtenido de Limites Atterberg: <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/>
- COTECNO.cl. (2022). *Granulometria: Análisis granulométrico de suelos por tamizado*. Obtenido de <https://www.cotecno.cl/granulometria-analisis-granulometrico-suelos>
- Crespo Villalaz, C. (2012). *Problemas resueltos de Mecánica de Suelos y de Cimentaciones*. (N. editores, Ed.) México, México: Limusa.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (Cuarta ed.). México, México: Cengage Learning Editores, S.A.
- Defensoría del Pueblo. (2023). *Reporte Defensorial de accidentes de tránsito N°01*. Lima. Obtenido de <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2023/04/Reporte-Defensorial-de-accidentes-de-tr%C3%A1nsito-N01-Abril-2023.pdf>
- Díaz Rodríguez, J. A. (2014). *Mecánica de suelos- Naturaleza y propiedades* (Primera ed.). México D.F., México: Editorial Trillas. Recuperado el 2022, de <https://es.scribd.com/doc/314395282/Mecanica-de-Suelos-Trillas>
- Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (2016). *Geomecanica para Ingenieros*. Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co>
- ESAN Intelligence. (2023). Los desafíos actuales de la infraestructura vial en Perú: propuestas de cierre de brechas. *Infraestructura vial en Perú*. Lima, Perú. Obtenido de <https://observatorio.esan.edu.pe/descargables/los-desafios-actuales-de-la-infraestructura-vial-en-peru-propuestas-de-cierre-de-brechas/>
- Flores Gongora, C. H., Caicedo Osorio, Z. K., Zárate Caballero, R., & Contreras Ortíz, B. A. (diciembre de 2008). Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes. *13(2)*, 19-31. Recuperado el 2016, de <https://doi.org/10.22463/0122820X.536>
- Fratelli, M. G. (1993). *Suelos, Fundaciones y Muros*. Venezuela: Astrom.
- Geotecniafacil.com. (2021). *Ensayo Proctor Normal y Modificado.Descripción e interpretación*. Obtenido de <https://geotecniafacil.com>
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (2005). *Mecánica de Suelos*. México, MEXICO: Limusa.
- Macías Loor, A. O., Carvajal Rivadeneira, D. D., Cobos Lucio, D. A., Fienco Sánchez, B. E., Peralta Delgado, J. A., & Zambrano Acosta, J. M. (Abril de 2018).

- MECANICA DE SUELO. 3 *Ciencias ingeniería y tecnología*. doi:<http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2018.33>
- MTC. (Mayo de 2018). *portal.mtc.gob.pe/estadisticas/trasnsportes.html*. Recuperado el Enero de 2022, de Informes y publicaciones/Transportes: [https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/files/mapas/transportes/infraestructura/0\\_0\\_infraestructura/infraestructura\\_transportes\\_2018.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/files/mapas/transportes/infraestructura/0_0_infraestructura/infraestructura_transportes_2018.pdf)
- MTC- SINAC. (Setiembre de 2021). *Mapa de Infraestructura de Transporte por Departamento*. Recuperado el diciembre de 2021, de MTC.gob.pe: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2231281/Mapa%20de%20Infraestructura%20de%20Transporte%20de%20Cajamarca.pdf?v=1633389583>
- MTC, R. N.-2.-M. (Octubre de 2014). *Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos*. Lima, Lima, Perú.
- MTCE1109. (16 de Marzo de 2004). *Norma Técnica de Estabilizadores Químicos. Estabilización Química de Suelos-Characterización del Estabilizador y Evaluación de Propiedades de Comportamiento de Suelo Mejorado*. Lima, Lima, Perú.
- Nadal, J. (junio de 1962). El suelo estabilizado, material de construcción. Los conglomerantes como estabilizadores de suelos. *Informes de la Construcción*, 15(141). Obtenido de <http://informesdeaconstruccion.revistas.csic.es>
- Norma Técnica Peruana. (29 de abril de 1999). NTP 339.134. *SUELOS. Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS)*, 1°, 28. Lima, Peru. Recuperado el 2022, de <https://es.scribd.com/document/411052065/NTP-339-134-1999-pdf>
- NORMA TECNICA PERUANA. (21 de abril de 1999). NTP 400.017.1999. *AGREGADOS. Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado, Segunda*, 10. Lima, Perú. Recuperado el 2022, de <https://docplayer.es>
- Solminihac Tampier, H., Echeverría G., G., & Thenoux Z., G. (enero-junio de 1989). Estabilización Química de Suelos: Aplicación en la construcción de estructuras de pavimentos. *Revista Ingeniería de Construcción*(6), 53-78. Recuperado el octubre de 2018, de <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10036>
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica* (Segunda ed.). España, Barcelona: Industrias Gráficas M. Pareja- Montaña.

UNI. (2006). *Primer Taller de Mecánica de Suelos- Compactacion de Suelos en Laboratorio utilizando una Energía Modificada (Proctor Modificado)*. Manual de Laboratorio, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Peru. Obtenido de <https://www.academia.edu>

Walsh Perú S.A. (2005). *Estudio de impacto ambiental y social proyecto de explotación de cantera GNL- Cañete, Perú*. Perú LNG, Cañete. Obtenido de <https://perulng.com>



## APÉNDICES

### Apéndice A: Propiedades físicas y clasificación del suelo

#### a. Contenido de humedad

**Tabla A 1**

*Determinación del contenido de humedad*

<b>MUESTRA:</b>	<b>CALICATA = C1</b>
Ptara (g)	55.09
Ptara + mh (g)	592.52
Ptara + ms (g)	507.84
Pw (g)	84.68
Pms	452.75
<b>W C1 (%)</b>	<b>18.70</b>

<b>MUESTRA:</b>	<b>CALICATA = C2</b>
Ptara (g)	63.35
Ptara + mh (g)	817.33
Ptara + ms (g)	751.66
Pw (g)	65.67
Pms	688.31
<b>W C2 (%)</b>	<b>9.54</b>

<b>MUESTRA:</b>	<b>CALICATA = C3</b>
Ptara (g)	55.2
Ptara + mh (g)	417.74
Ptara + ms (g)	373.27
Pw (g)	44.47
Pms	318.07
<b>W C3 (%)</b>	<b>13.98</b>

La tabla muestra los resultados de la humedad en las muestras obtenidas de las tres calicatas.

**b. Peso unitario seco**

**Tabla A 2**

*Peso unitario seco de las muestras*

DESCRIPCION	CALICATA		
	C1	C2	C3
Volumen molde (m <sup>3</sup> )	943.39x10 <sup>-6</sup>	943.39x10 <sup>-6</sup>	943.39x10 <sup>-6</sup>
Peso de molde (kg)	4.31	4.31	4.31
Peso molde + peso muestra seca (kg)	5.40	5.57	5.50
Peso muestra (kg)	1.09	1.26	1.19
Peso unitario suelto seco (kg/m <sup>3</sup> )	1 153,29	1 337,73	1 259,29

En la tabla se muestra los resultados del peso unitario de las muestras de suelo seco de cada calicata.

**c. Análisis granulométrico de las muestras**

**Tabla A 3**

*Análisis Granulométrico para la muestra de la calicata C1*

TAMIZ		Peso retenido (gr)	% PR	%PAR	% PASA
N°	ABERT. (mm)				
4	4.750	1.35	0.27	0.27	99.73
10	2.000	2.97	0.59	0.86	99.14
20	0.850	4.89	0.98	1.84	98.16
40	0.425	6.77	1.35	3.20	96.80
60	0.250	7.36	1.47	4.67	95.33
100	0.150	10.87	2.17	6.84	93.16
140	0.106	8.38	1.68	8.52	91.48
200	0.075	7.07	1.41	9.93	90.07
Cazoleta (lavado)	0.000	*450.34	90.07	100	0
Total		500	100		

La tabla muestra el porcentaje de suelo que pasa los tamices después de realizarse el lavado, \* suelo que ha sido eliminado en el lavado.

**Tabla A 4***Análisis Granulométrico para la muestra de la calicata C2*

TAMIZ		PR (gr)	% PR	%PAR	% PASA
N°	ABERT. (mm)				
4	4.750	2.88	0.58	0.58	99.42
10	2.000	7.51	1.50	2.08	97.92
20	0.850	7.03	1.41	3.48	96.52
40	0.425	8.47	1.69	5.18	94.82
60	0.250	16.16	3.23	8.41	91.59
100	0.150	29.49	5.90	14.31	85.69
140	0.106	24.82	4.96	19.27	80.73
200	0.075	18.45	3.69	22.96	77.04
Cazoleta (lavado)	0.000	*385.19	77.04	100	0
<b>TOTAL</b>		<b>500</b>	<b>100</b>		

Los datos de la tabla muestran los resultados del porcentaje de suelo que pasa los tamices después de realizare el lavado, \* cantidad de suelo que ha sido eliminado en el lavado.

**Tabla A 5***Análisis granulométrico para la muestra de la calicata C3*

TAMIZ		PR (gr)	% PR	%PAR	% PASA
N°	ABERT. (mm)				
4	4.750	4.51	0.90	0.90	99.10
10	2.000	7.21	1.44	2.34	97.66
20	0.850	6.66	1.33	3.68	96.32
40	0.425	11.54	2.31	5.98	94.02
60	0.250	21.5	4.30	10.28	89.72
100	0.150	35.29	7.06	17.34	82.66
140	0.106	28.72	5.74	23.09	76.91
200	0.075	17.62	3.52	26.61	73.39
Cazoleta (lavado)		*366.95	73.39	100	0
<b>TOTAL</b>		<b>500</b>	<b>100</b>		

Los resultados presentados reflejan los porcentajes de suelo que pasa de cada tamiz después del lavado, \*cantidad de suelo que fue eliminado en el lavado.

**d. Límites de plasticidad de muestras patrón**

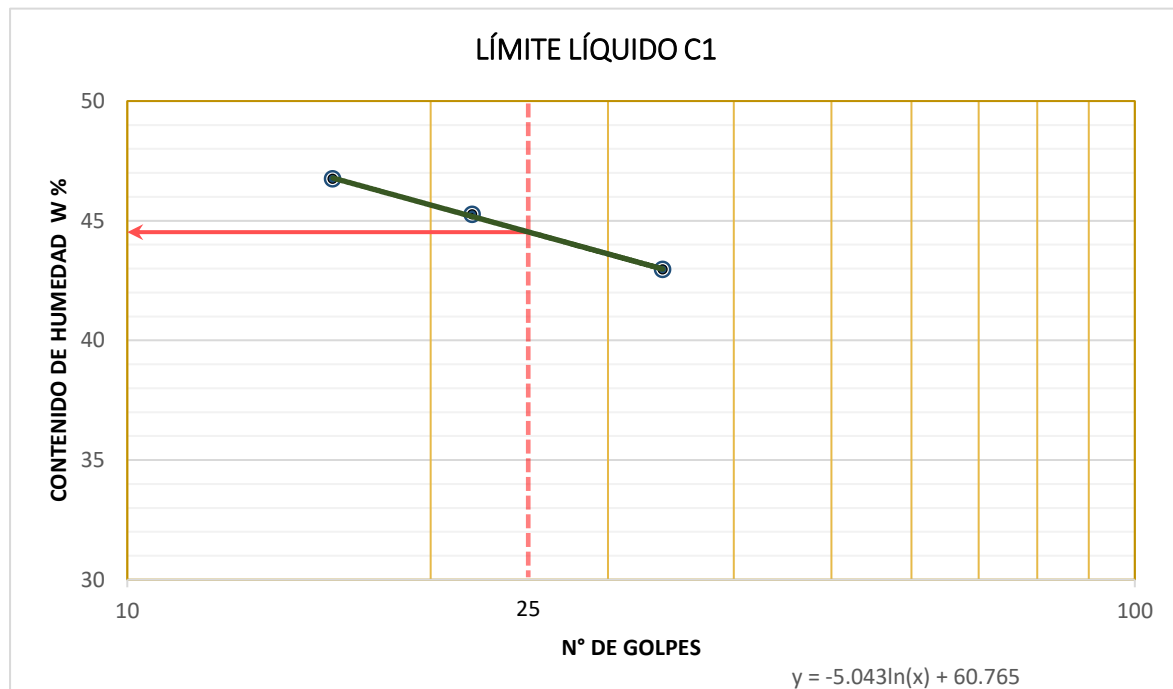
**Tabla A 6**

*Datos para el cálculo del límite líquido del suelo C1*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO C1		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	10.99	11.17	11.2
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	41.71	44.78	45.42
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	32.48	34.31	34.52
D	Peso del agua (B-C)	gr	9.23	10.47	10.90
E	Peso del suelo (C-A)	gr	21.49	23.14	23.32
F	Nº de golpes	und	34	22	16
G	<b>Contenido de humedad (D/E)*100</b>	<b>%</b>	<b>42.95</b>	<b>45.25</b>	<b>46.74</b>

**Figura A 1**

*Límite líquido para la calicata C1*



El gráfico muestra el resultado de LL=44,53 %  $\cong$  45 % para 25 golpes.

**Tabla A 7***Límite plástico para la calicata C1*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO C1		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	g	10.95	8.77	8.61
B	Peso muestra húmeda + recipiente	g	17.14	13.42	13.05
C	Peso muestra seca + recipiente	g	15.83	12.45	12.12
D	Peso del agua (B-C)	g	1.31	0.97	0.93
E	Peso del suelo (C-A)	g	4.88	3.68	3.51
F	Humedad ((D/E)*100)	%	26.84	26.36	26.5
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>26.57</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>27</b>	

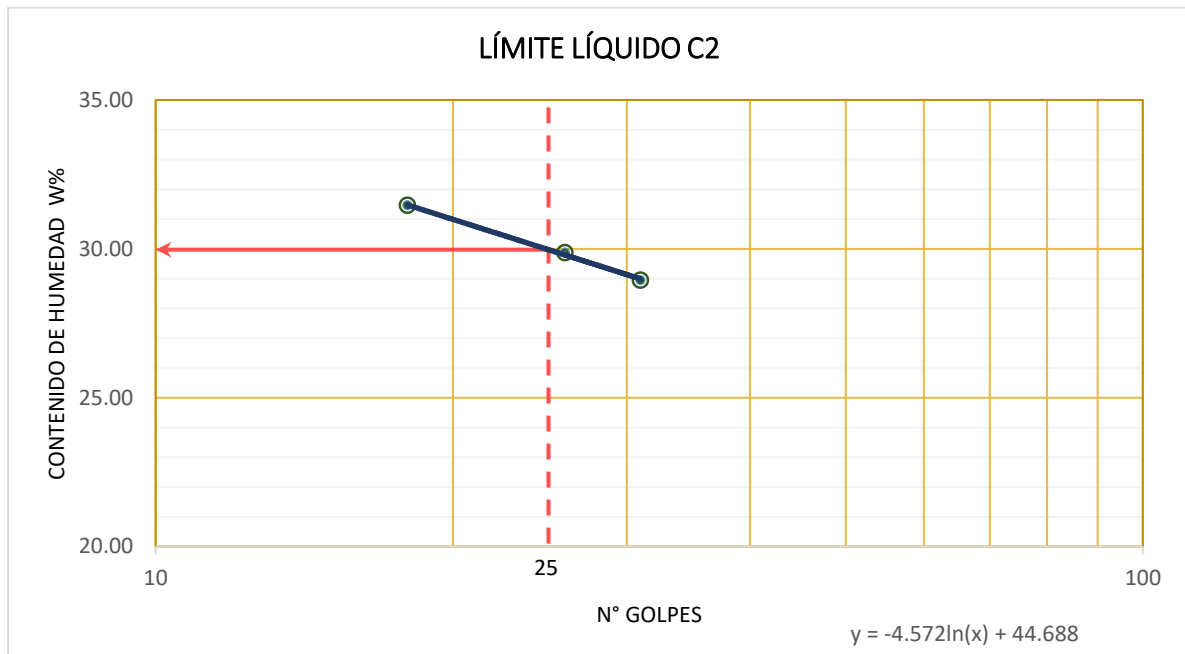
La tabla nos muestra el cálculo del contenido de humedad de las muestras, que representa el resultado del límite de plástico (LP) para la calicata C1.

**Tabla A 8***Datos para el cálculo del límite líquido del suelo C2*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO C2		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	g	9.95	11.16	11.45
B	Peso muestra húmeda + recipiente	g	36.07	35.47	37.38
C	Peso muestra seca + recipiente	g	29.82	29.88	31.56
D	Peso del agua (B-C)	g	6.25	5.59	5.78
E	Peso del suelo (C-A)	g	19.87	18.72	20.11
F	Nº de golpes	und	18	26	31
G	<b>Contenido de Humedad ((D/E)*100)</b>	%	<b>31.45</b>	<b>29.86</b>	<b>28.94</b>

## Figura A 2

Límite líquido para la calicata C2



El gráfico muestra el LL= 29,97 %  $\cong$  30 % para 25 golpes.

## Tabla A 9

Límite plástico para el suelo C2

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO C2		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	g	9.96	10.7	11.57
B	Peso muestra húmeda + recipiente	g	15.7	16.53	16.8
C	Peso muestra seca + recipiente	g	14.81	15.66	16
D	Peso del agua (B-C)	g	0.89	0.87	0.80
E	Peso del suelo (C-A)	g	4.85	4.96	4.43
F	Humedad ((D/E)*100)	%	18.35	17.54	18.06
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>17.98</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>18</b>	

La tabla nos muestra el resultado del contenido de humedad de las muestras que representa el límite plástico de la calicata C2.

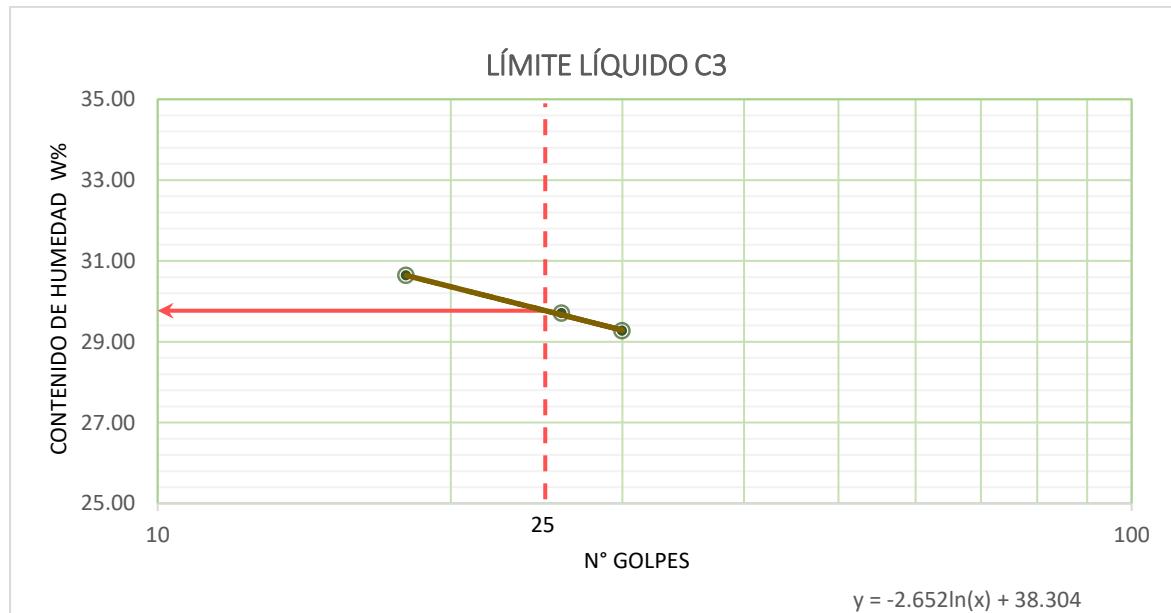
**Tabla A 10**

*Datos para el cálculo del límite líquido del suelo C3*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO C3		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	g	11.52	10.94	9.97
B	Peso muestra húmeda + recipiente	g	43.31	37.17	42.79
C	Peso muestra seca + recipiente	g	36.03	31.02	35.36
D	Peso del agua (B-C)	g	7.28	6.15	7.43
E	Peso del suelo (C-A)	g	24.51	20.08	25.39
F	N° de golpes	und	26	18	30
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	%	<b>29.70</b>	<b>30.63</b>	<b>29.26</b>

**Figura A 3**

*Límite líquido para la calicata C3*



El gráfico muestra el cálculo del límite líquido con 25 golpes, donde  $LL = 29,77\% \cong 30\%$ .

**Tabla A 11***Límite plástico para la calicata C3*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO C3	
			1	2
A	Peso del recipiente	gr	11.58	11.16
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	16.85	17.15
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	16.11	16.23
D	Peso del agua (B-C)	gr	0.74	0.92
E	Peso del suelo (C-A)	gr	4.53	5.07
F	Humedad (D/E)*100	%	16.34	18.15
<b>G</b>	<b>Contenido de humedad promedio</b>	<b>%</b>	<b>17.25</b>	
	<b>LP</b>	<b>%</b>	<b>17</b>	

La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de la calicata C3.

***e. Límites de plasticidad adicionando estabilizante Terrasil***

**Calicata C1**

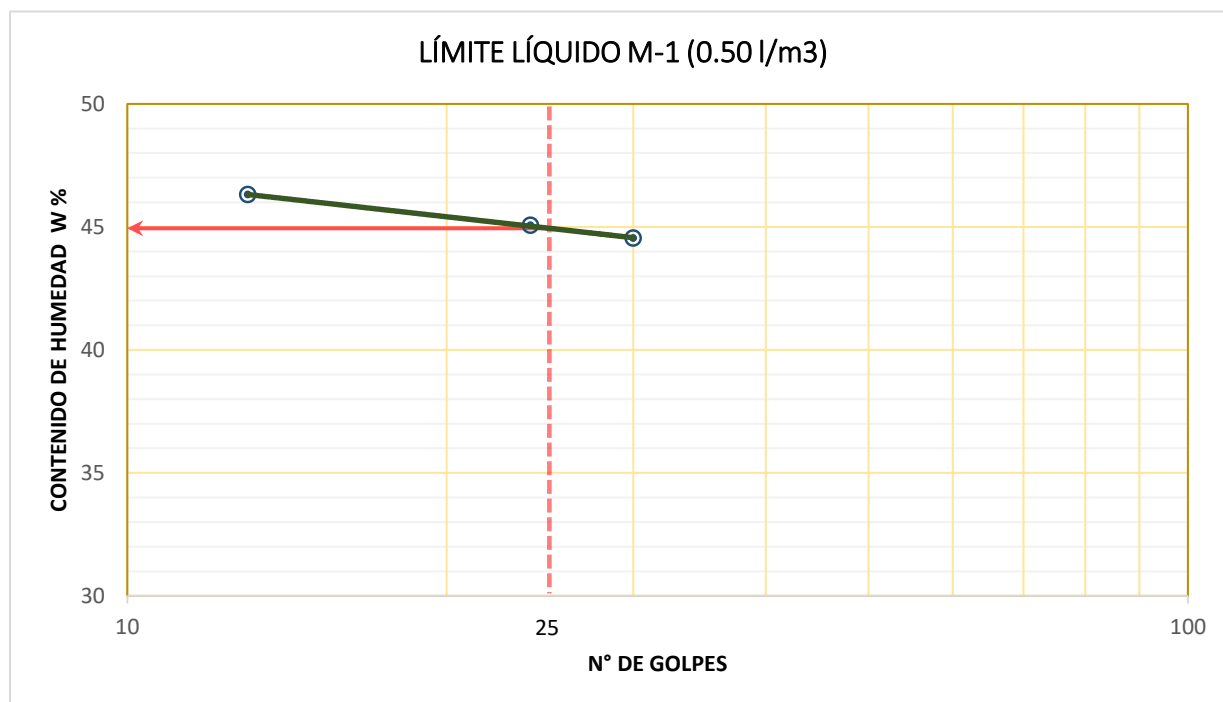
**Tabla A 12***Datos para calcular el límite líquido de M-1 y Terrasil al 0.50 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-1 (0.50 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	11.37	11.47	11
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	37.31	34.22	36.85
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	29.1	27.21	28.82
D	Peso del agua (B-C)	gr	8.21	7.01	8.03
E	Peso del suelo (C-A)	gr	17.73	15.74	17.82
F	N° de golpes	und	13	30	24
<b>G</b>	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	<b>%</b>	<b>46.31</b>	<b>44.54</b>	<b>45.06</b>



**Figura A 4**

*Límite líquido para la M-1 y Terrasil al 0.50 l/m<sup>3</sup>*



El gráfico semilogarítmico muestra el cálculo del límite líquido suelo arcilloso y estabilizante Terrasil LL= 44,94 %  $\cong$  45 % con 25 golpes en el eje de las abscisas.

**Tabla A 13**

*Límite plástico para M-1 y Terrasil 0.50 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO M-1 (0.5 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	11.12	23.52	11.23
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	19.99	32.53	20.07
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	17.84	30.26	17.88
D	Peso del agua (B-C)	gr	2.15	2.27	2.19
E	Peso del suelo (C-A)	gr	6.72	6.74	6.65
F	Humedad (D/E)*100	%	31.99	33.68	32.93
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>32.87</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>33</b>	

La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico suelo arcilloso y Terrasil.

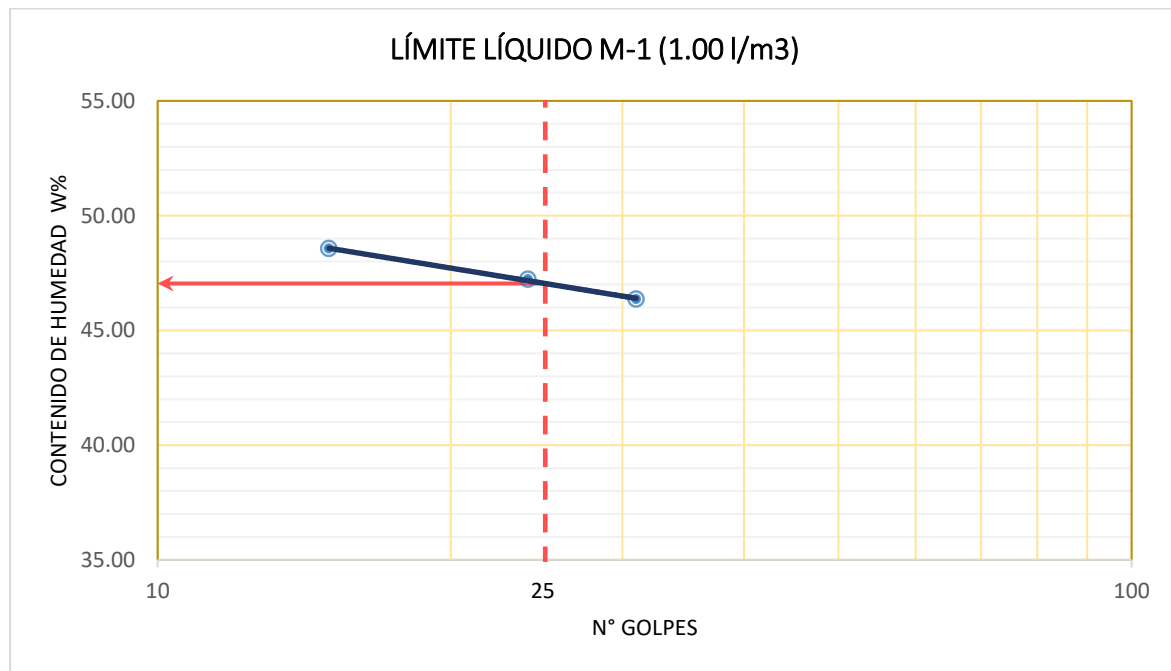
**Tabla A 14**

*Datos para calcular el límite líquido de M-1 y Terrasil 1.00 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-1 (1.00 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	10.77	10.69	11.45
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	40.17	40.4	46.4
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	30.56	30.87	35.33
D	Peso del agua (B-C)	gr	9.61	9.53	11.07
E	Peso del suelo (C-A)	gr	19.79	20.18	23.88
F	N° de golpes	und	15	24	31
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	%	<b>48.56</b>	<b>47.22</b>	<b>46.36</b>

**Figura A 5**

*Límite líquido para M-1 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>*



El gráfico semilogarítmico muestra el cálculo del límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil  $LL = 47,04 \% \cong 47 \%$  para 25 golpes en el eje de las abscisas.

**Tabla A 15***Límite plástico para M-1 y Terrasil 1.00 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO M-1 (1.00 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	23.6	23.53	23.6
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	35.39	32.3	31.8
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	32.24	30.05	29.63
D	Peso del agua (B-C)	gr	3.15	2.25	2.17
E	Peso del suelo (C-A)	gr	8.64	6.52	6.03
F	Humedad (D/E)*100	%	36.46	34.51	35.99
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>35.65</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>36</b>	

La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de suelo arcilloso y Terrasil.

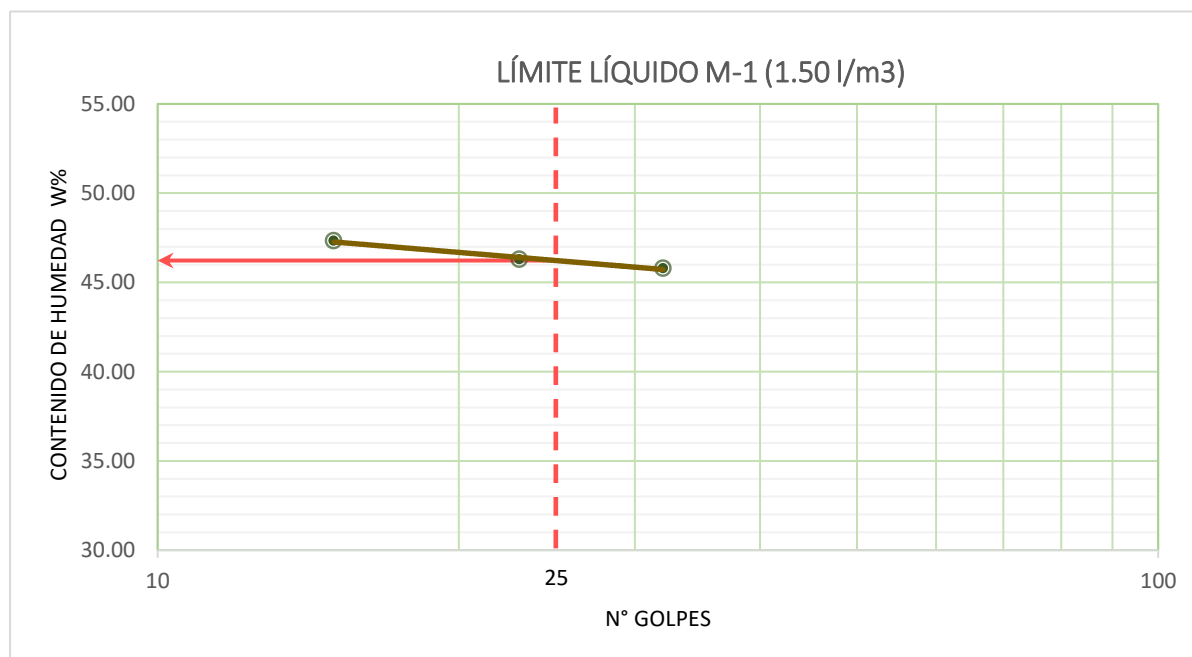
**Tabla A 16***Datos para calcular el límite líquido de M-1 y Terrasil 1.50 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-1 (1.50 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	11.47	11.13	11.23
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	41.97	40.59	39.31
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	32.39	31.27	30.29
D	Peso del agua (B-C)	gr	9.58	9.32	9.02
E	Peso del suelo (C-A)	gr	20.92	20.14	19.06
F	N° de golpes	und	32	23	15
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	%	<b>45.79</b>	<b>46.28</b>	<b>47.32</b>

La tabla muestra los resultados del contenido de humedad que se ha obtenido mediante el ensayo de límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil.

### Figura A 6

Límite líquido para M-1 y Terrasil al 1.50 l/m<sup>3</sup>



El gráfico muestra el cálculo del límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil LL= 46,23 %  $\cong$  46 % para 25 golpes.

### Tabla A 17

Límite plástico para M-1 y Terrasil 1.50 l/m<sup>3</sup>

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO M-1 (1.50 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	23.2	11.02	23.4
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	31.86	24.29	30.81
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	29.63	20.84	28.89
D	Peso del agua (B-C)	gr	2.23	3.45	1.92
E	Peso del suelo (C-A)	gr	6.43	9.82	5.49
F	Humedad (D/E)*100	%	34.68	35.13	34.97
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>34.93</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>35</b>	

La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de suelo arcilloso y Terrasil.

## Calicata C2

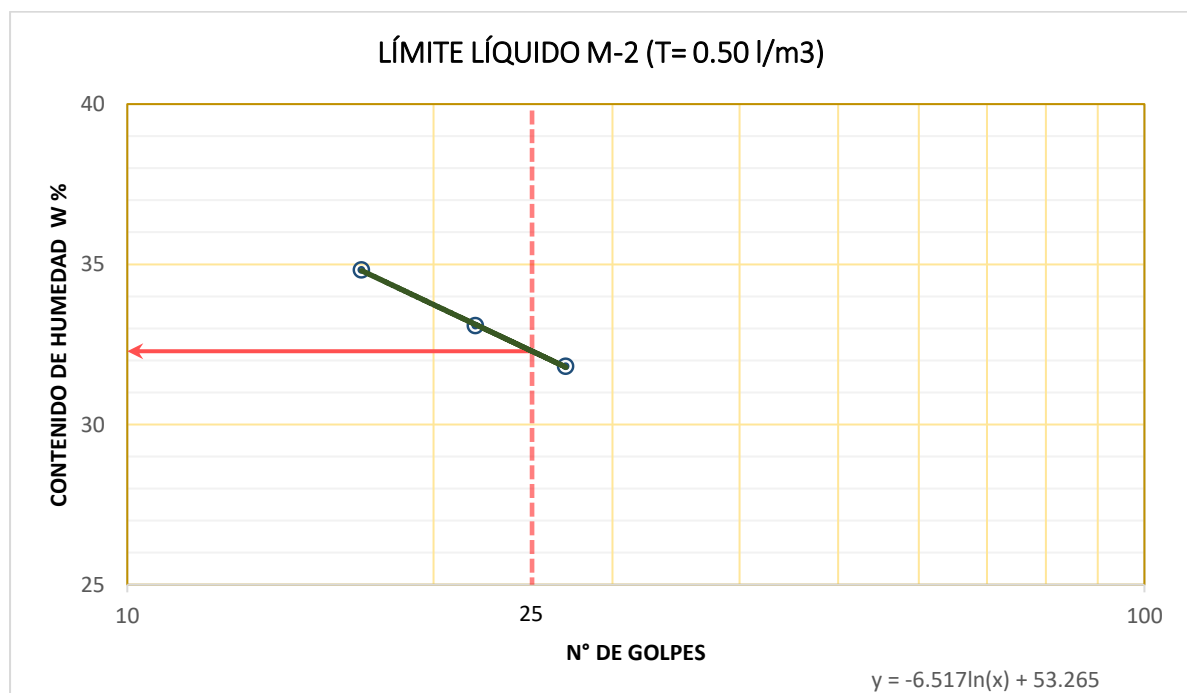
**Tabla A 18**

Datos para calcular el límite líquido de M-2 y Terrasil 0.50 l/m<sup>3</sup>

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-2 (0.5 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	11.67	11.05	11.22
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	46.48	50.66	39.06
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	37.49	41.1	32.14
D	Peso del agua (B-C)	gr	8.99	9.56	6.92
E	Peso del suelo (C-A)	gr	25.82	30.05	20.92
F	N° de golpes	und	17	27	22
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	%	<b>34.82</b>	<b>31.81</b>	<b>33.08</b>

**Figura A 7**

Límite líquido para M-2 y Terrasil al 0.50 l/m<sup>3</sup>



El gráfico semilogarítmico muestra el cálculo del límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil LL= 32,29 %  $\cong$  32 % para 25 golpes.

**Tabla A 19***Límite plástico para M-2 y Terrasil al 0.50 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCION	UND	LÍMITE PLÁSTICO M-2 (0.5 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	23.6	23.4	23.52
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	29.2	31.14	30.64
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	28.09	29.6	29.3
D	Peso del agua (B-C)	gr	1.11	1.54	1.34
E	Peso del suelo (C-A)	gr	4.49	6.20	5.78
F	Humedad (D/E)*100	%	24.72	24.84	23.18
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	<b>%</b>		<b>24.25</b>	
	<b>LP</b>	<b>%</b>		<b>24</b>	

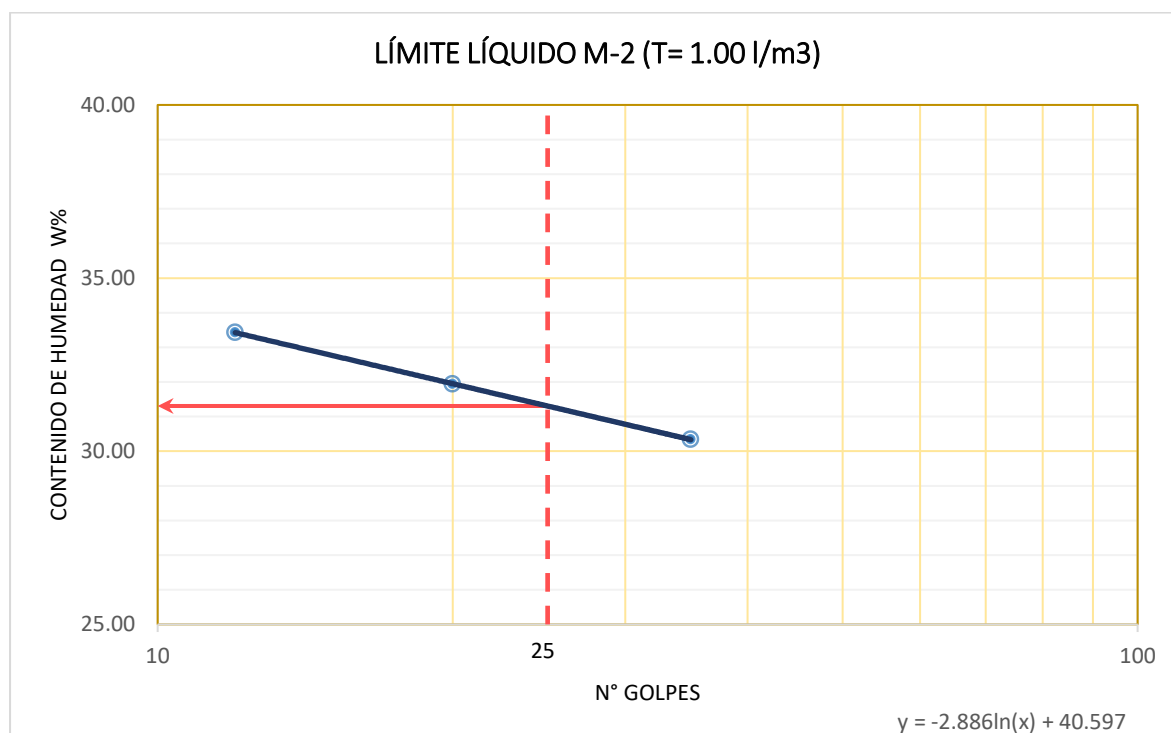
La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de suelo arcilloso y Terrasil.

**Tabla A 20***Datos para calcular el límite líquido de M-2 y Terrasil 1.00 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-2 (1.00 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	10.76	11.03	11.36
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	38.54	39.78	47.27
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	31.58	32.82	38.91
D	Peso del agua (B-C)	gr	6.96	6.96	8.36
E	Peso del suelo (C-A)	gr	20.82	21.79	27.55
F	N° de golpes	und	12	20	35
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	<b>%</b>	<b>33.43</b>	<b>31.94</b>	<b>30.34</b>

**Figura A 8**

Límite líquido para M-2 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>



El gráfico semilogarítmico muestra el cálculo del límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil LL= 31,31 %  $\cong$  31 % para 25 golpes.

**Tabla A 21**

Límite plástico para M-2 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO M-2 (1.00 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	23.19	11.12	11.46
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	30.19	20.93	24.14
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	28.8	18.92	21.54
D	Peso del agua (B-C)	gr	1.39	2.01	2.60
E	Peso del suelo (C-A)	gr	5.61	7.80	10.08
F	Humedad (D/E)*100	%	24.78	25.77	25.79
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>25.45</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>25</b>	

La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de suelo arcilloso y Terrasil.

**Tabla A 22**

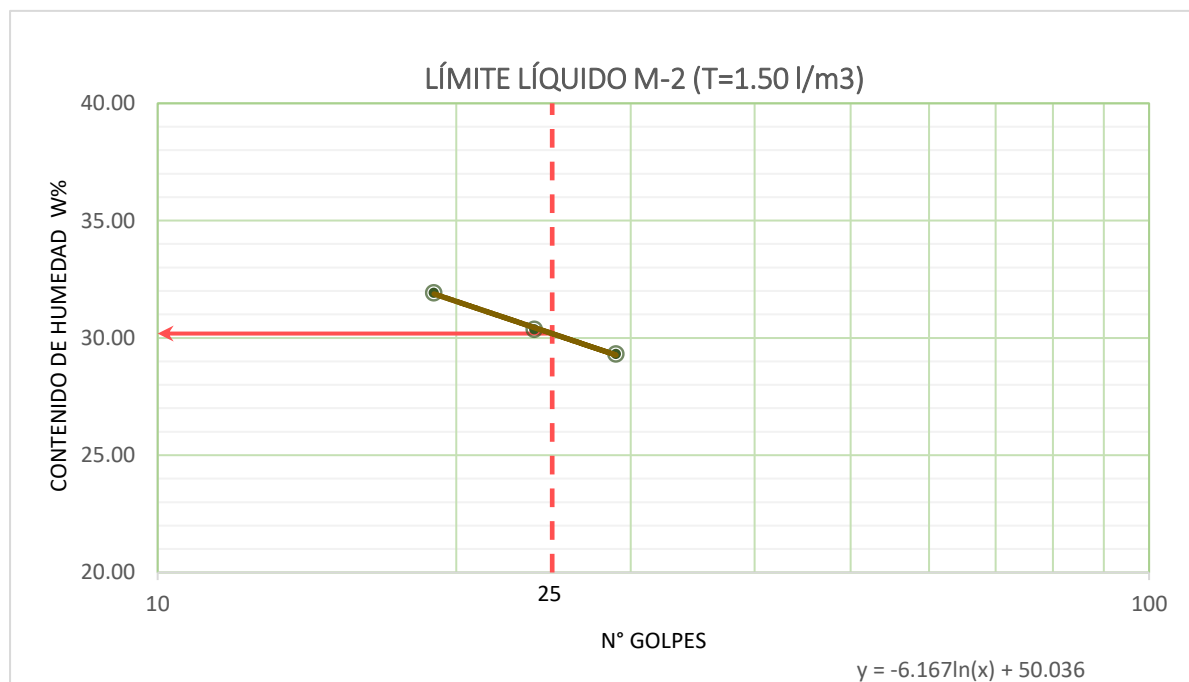
*Datos para calcular el límite líquido de M-2 y Terrasil 1.50 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-2 (1.50 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	11.63	11.05	10.76
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	39.16	41.14	45.24
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	32.5	34.32	37.21
D	Peso del agua (B-C)	gr	6.66	6.82	8.03
E	Peso del suelo (C-A)	gr	20.87	23.27	26.45
F	N° de golpes	und	19	29	24
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	<b>%</b>	<b>31.91</b>	<b>29.31</b>	<b>30.36</b>

La tabla muestra los resultados del contenido de humedad que se ha obtenido mediante el ensayo de límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil.

**Figura A 9**

*Límite líquido para M-2 y Terrasil al 1.50 l/m*



El gráfico semilogarítmico muestra el cálculo del límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil LL= 30,19 %  $\cong$  30 % para 25 golpes.



**Tabla A 23***Límite plástico para M-2 y Terrasil al 1.50 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO M-2 (1.50 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	23.39	23.59	23.21
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	33.64	34.99	32.23
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	31.68	32.74	30.45
D	Peso del agua (B-C)	gr	1.96	2.25	1.78
E	Peso del suelo (C-A)	gr	8.29	9.15	7.24
F	Humedad (D/E)*100	%	23.64	24.59	24.59
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>24.27</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>24</b>	

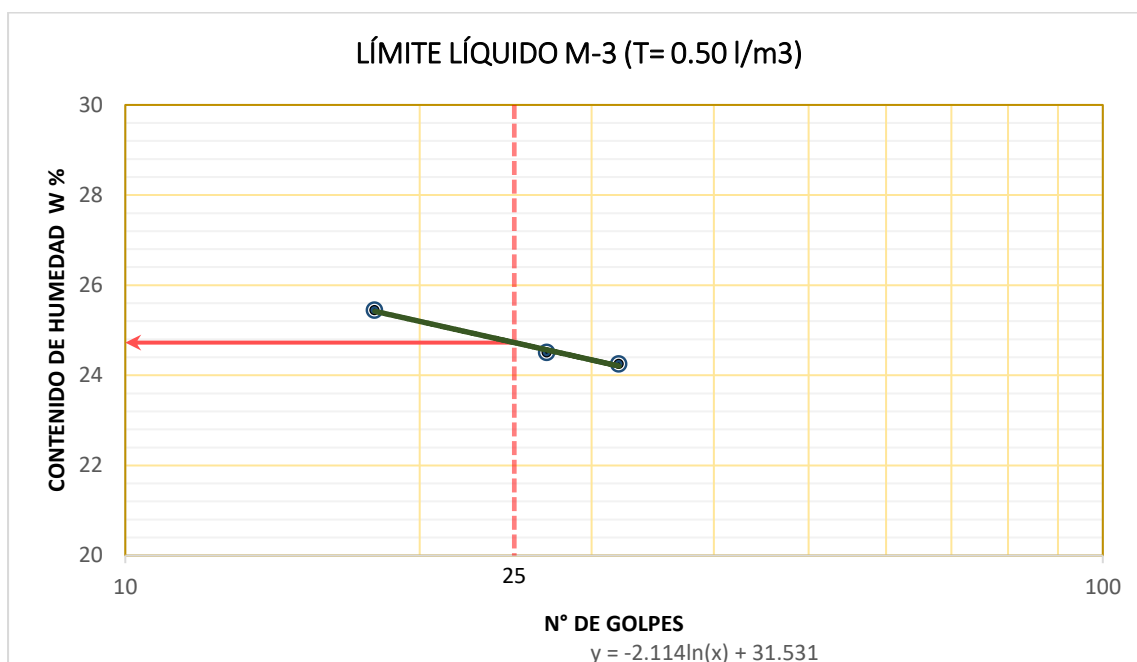
La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de suelo arcilloso y Terrasil.

**Calicata C3****Tabla A 24***Datos para calcular el límite líquido de M-3 y Terrasil 0.50 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-3 (0.5 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	11.29	11.23	10.69
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	44.67	41.52	43.64
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	37.9	35.56	37.21
D	Peso del agua (B-C)	gr	6.77	5.96	6.43
E	Peso del suelo (C-A)	gr	26.61	24.33	26.52
F	Nº de golpes	und	18	27	32
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	%	<b>25.44</b>	<b>24.5</b>	<b>24.25</b>

**Figura A 10**

Límite líquido para M-3 y Terrasil al 0.50 l/m<sup>3</sup>



El gráfico semilogarítmico muestra el cálculo del límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil LL= 24,73 %  $\cong$  25 % para 25 golpes.

**Tabla A 25**

Límite plástico para M-3 y Terrasil al 0.50 l/m<sup>3</sup>

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO M-3 (0.5 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	23.19	23.4	23.59
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	28.42	28.59	27.2
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	27.57	27.81	26.64
D	Peso del agua (B-C)	gr	0.85	0.78	0.56
E	Peso del suelo (C-A)	gr	4.38	4.41	3.05
F	Humedad (D/E)*100	%	19.41	17.69	18.36
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>18.49</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>18</b>	

La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de suelo arcilloso y Terrasil.

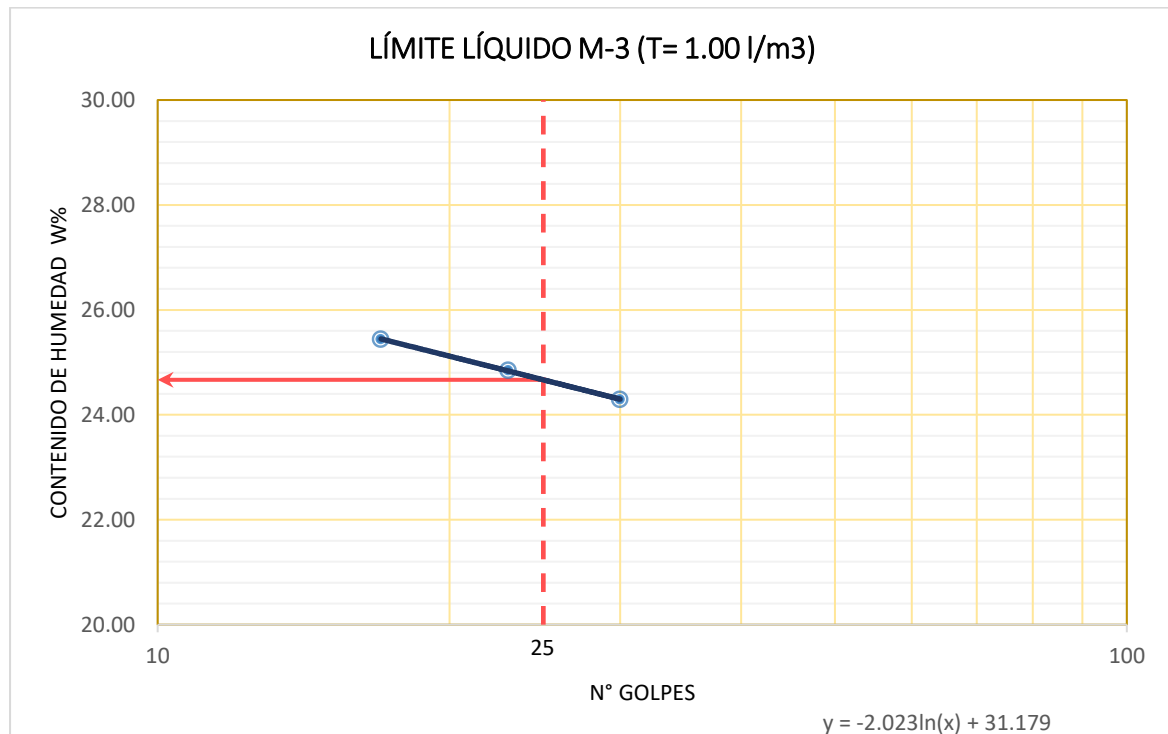
**Tabla A 26**

*Datos para calcular el límite líquido de M-3 y Terrasil 1.00 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-3 (1.00 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	11.04	11.67	10.01
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	44.87	43.12	35.44
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	38.01	36.86	30.47
D	Peso del agua (B-C)	gr	6.86	6.26	4.97
E	Peso del suelo (C-A)	gr	26.97	25.19	20.46
F	N° de golpes	und	17	23	30
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	<b>%</b>	<b>25.44</b>	<b>24.85</b>	<b>24.29</b>

**Figura A 11**

*Límite líquido para M-3 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>*



El gráfico semilogarítmico muestra el cálculo del límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil LL= 24,67 %  $\cong$  25 % para 25 golpes.

**Tabla A 27***Límite plástico para M-3 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE PLÁSTICO M-3 (1.00 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	23.6	10	10.79
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	29.78	19.56	20.95
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	28.81	18.01	19.25
D	Peso del agua (B-C)	gr	0.97	1.55	1.70
E	Peso del suelo (C-A)	gr	5.21	8.01	8.46
F	Humedad (D/E)*100	%	18.62	19.35	20.09
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	<b>%</b>		<b>19.35</b>	
	<b>LP</b>	<b>%</b>		<b>19</b>	

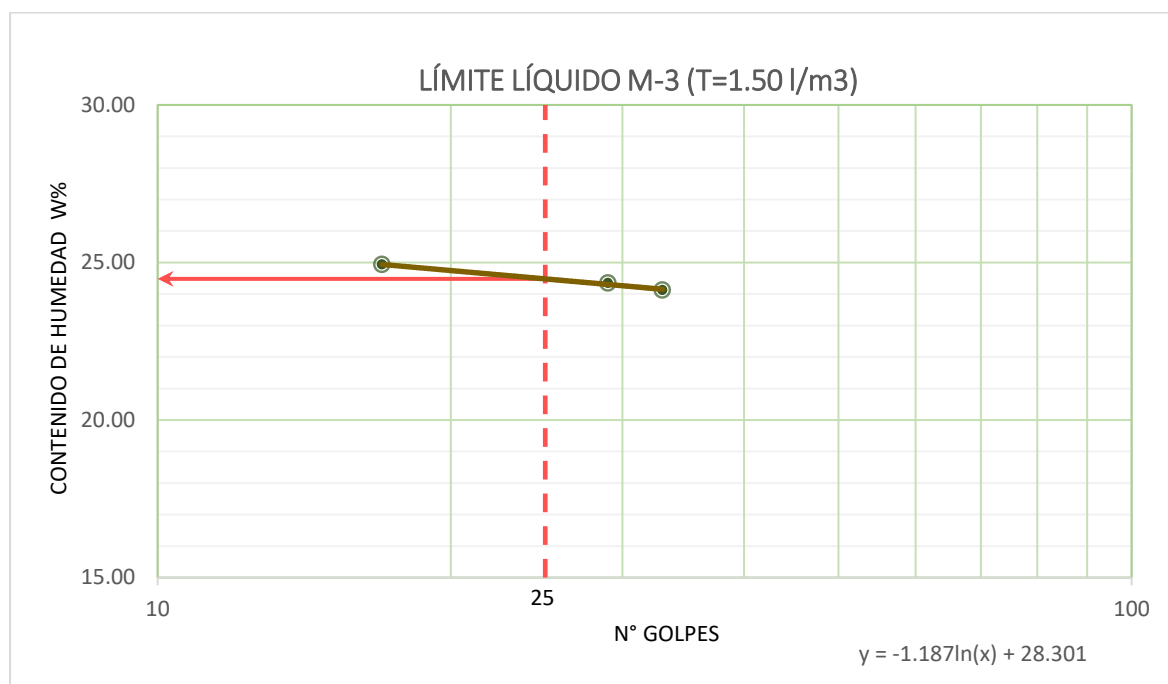
La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de suelo arcilloso y Terrasil.

**Tabla A 28***Datos para calcular el límite líquido de M-3 y Terrasil 1.50 l/m<sup>3</sup>*

ID	DESCRIPCIÓN	UND	LÍMITE LÍQUIDO M-3 (1.50 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	10.74	11	11.13
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	46.57	54.94	58.07
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	39.42	46.40	48.88
D	Peso del agua (B-C)	gr	7.15	8.54	9.19
E	Peso del suelo (C-A)	gr	28.68	35.40	37.75
F	N° de golpes	und	17	33	29
G	<b>Contenido de Humedad (D/E)*100</b>	<b>%</b>	<b>24.93</b>	<b>24.12</b>	<b>24.34</b>

**Figura A 12**

Límite líquido para M-3 y Terrasil al 1.50 l/m<sup>3</sup>



El gráfico muestra el cálculo del límite líquido del suelo arcilloso y estabilizante Terrasil LL= 24,5 %  $\cong$  25 % para 25 golpes.

**Tabla A 29**

Límite plástico para M-3 y Terrasil al 1.50 l/m<sup>3</sup>

ID	DESCRIPCION	UND	LIMITE PLASTICO M-3 (1.50 l/m <sup>3</sup> )		
			1	2	3
A	Peso del recipiente	gr	11.45	11.49	11.48
B	Peso muestra húmeda + recipiente	gr	24.87	17.77	19.07
C	Peso muestra seca + recipiente	gr	22.72	16.79	17.85
D	Peso del agua (B-C)	gr	2.15	0.98	1.22
E	Peso del suelo (C-A)	gr	11.27	5.30	6.37
F	Humedad (D/E)*100	%	19.08	18.49	19.15
G	<b>Contenido de humedad promedio</b>	%		<b>18.91</b>	
	<b>LP</b>	%		<b>19</b>	

La tabla muestra el resultado del contenido de humedad que corresponde al límite plástico de suelo arcilloso y Terrasil.

#### **f. Clasificación del suelo mediante el método SUCS**

Con los resultados de los ensayos realizados; análisis granulométrico y límites de plasticidad se realiza la clasificación de suelos mediante el método de SUCS (Anexo A).

1° Se tiene que más del 50 % del suelo de las 3 calicatas; C1, C2 y C3 pasan el tamiz N° 200. El cual indica que es un suelo de grano fino.

2° En el ensayo de límites de Atterberg se obtuvo que los límites líquidos de las 3 muestras tienen un valor menor que el 50 %, lo que indica que se trata de un suelo de baja plasticidad.

Datos ingresados en la carta de plasticidad:

Para la Calicata C1:

$$IP = LL - LP$$

$$IP = (45 \% - 27 \%) = 18 \%$$

$$LL = 45 \%$$

Para la calicata C2

$$IP = (30 \% - 18 \%) = 12 \%$$

$$LL = 30 \%$$

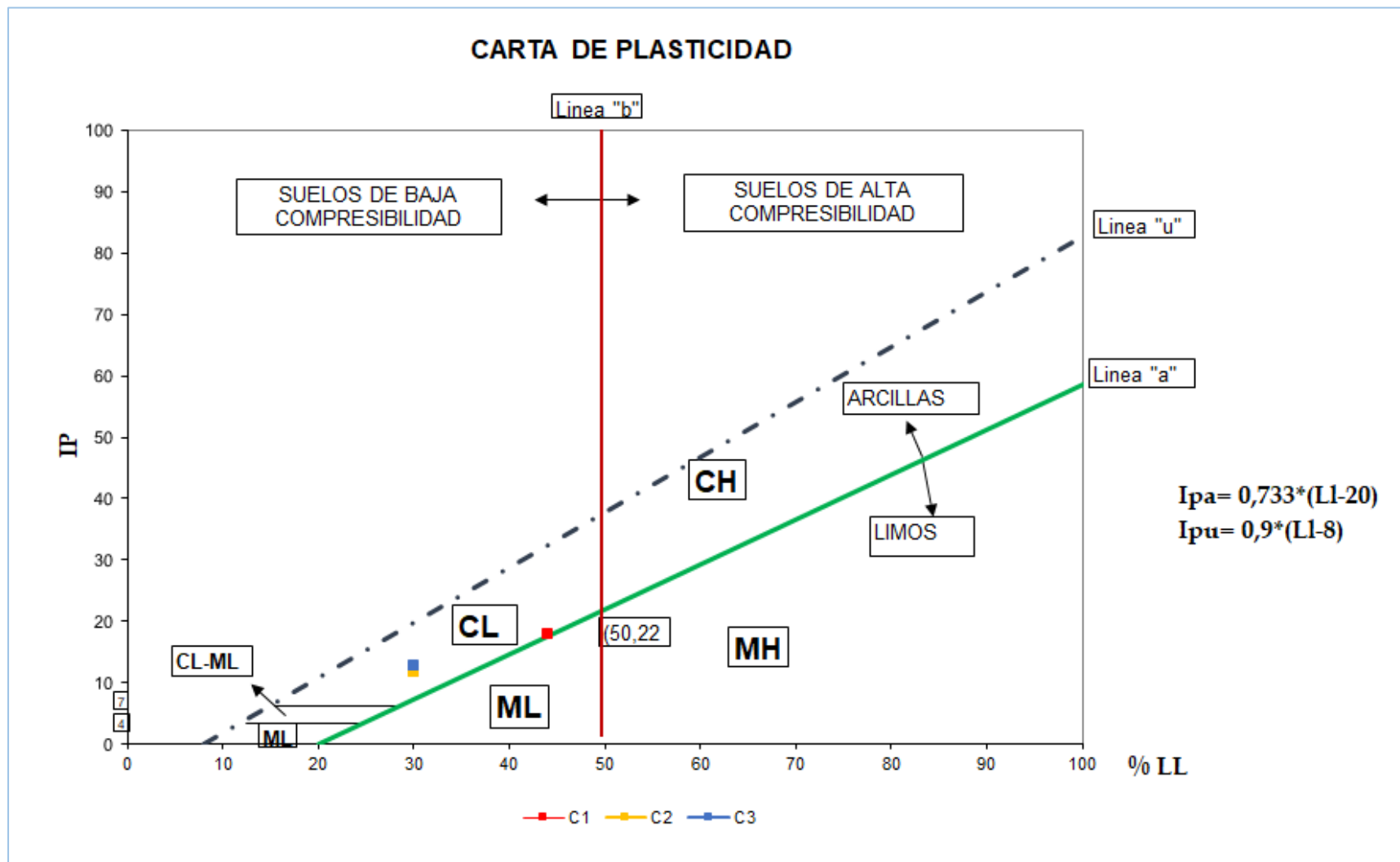
Para la calicata C3

$$IP = (30 \% - 17 \%) = 13 \%$$

$$LL = 30 \%$$

**Figura A 13**

*Muestras de suelo arcilloso en el cuadro de plasticidad*



### **g. Clasificación del suelo mediante el método AASHTO**

1° En el análisis granulométrico más del 35 % de suelo pasa el tamiz N° 200 por lo tanto las muestras de C1, C2 y C3 son suelos finos (limo - arcilloso).

2° Para el suelo de la calicata C1 con  $LL \geq 41$  % e  $IP \geq 11$  % se encuentra dentro del grupo A-7 luego para determinar el sub grupo se realiza el cálculo:

$$LL - 30 = 45 - 30 = 15$$

$$IP > LL - 30$$

$$18 \% > 15\%$$

Además:

El índice de grupo IG calculado mediante la ecuación 8.

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

$$IG = (90.07 - 35)(0.2 + 0.005(45 - 40)) + 0.01(90.07 - 15)(18 - 10)$$

$$IG = 18.3964 \cong 18$$

3° Quedando la clasificación del suelo para **C1= A-7-6(18)**

4° Para el suelo de la calicata C2 con,  $LL \leq 40$  % e  $IP \geq 11$  % se encuentra dentro del grupo A-6, suelos arcillosos como mayor constituyente. Seguidamente se calcula el índice de grupo IG.

$$IG = (77.04 - 35)(0.2 + 0.005(30 - 40)) + 0.01(77.04 - 15)(12 - 10)$$

$$IG = 7.5468 \cong 8$$

5° Entonces la clasificación de suelo de la calicata C2 seria **A-6(8)**.

6° Para el suelo de la calicata C3 con,  $LL \leq 40$  % e  $IP \geq 11$  % el cual también se encuentra dentro del grupo A-6, con suelo arcilloso como mayor constituyente. Para este suelo el índice de grupo IG seria:

$$IG = (73.39 - 35)(0.2 + 0.005(30 - 40)) + 0.01(73.39 - 15)(13 - 10)$$

$$IG = 7.51 \cong 8$$

7° Por lo tanto, el tipo de suelo para la calicata C3 seria **A-6(8)**.



## Apéndice B. Parámetros de compactación de las muestras patrón.

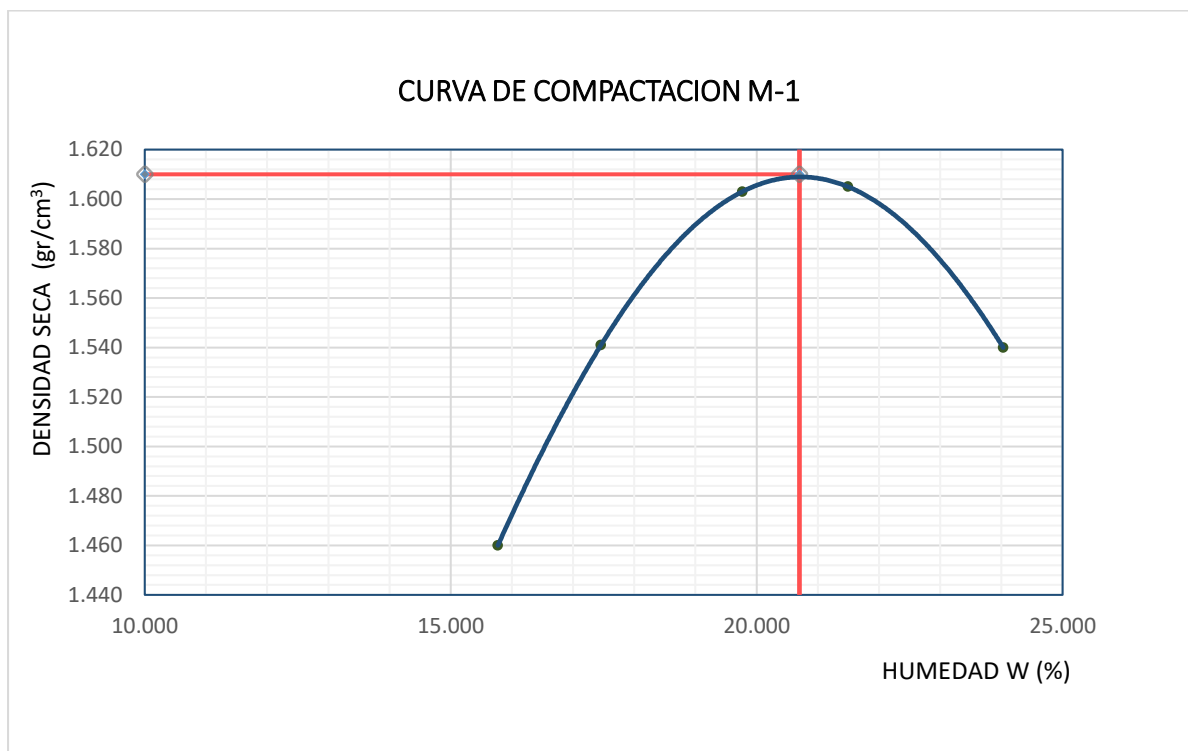
**Tabla B 1**

*Proctor modificado de la muestra patrón M-1*

ENSAYO:		PROCTOR MODIFICADO M-1									
MOLDE N°	1	2	3	4	5						
<i>Pmolde (gr)</i>	1794	1794	1794	1794	1794						
<i>Pmolde+ Pmh(gr)</i>	3389	3506	3607	3634	3594						
<i>Pmh (gr)</i>	1595	1712	1813	1840	1800						
<i>Vmh (cm<sup>3</sup>)</i>	944	944	944	944	944						
<i>ρ<sub>h</sub> (gr/cm<sup>3</sup>)</i>	1.69	1.81	1.92	1.95	1.91						
TARA N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
<i>Pt (gr)</i>	50.07	51.08	63.34	59.43	50.19	54.51	54.41	50.46	49.5	54.04	
<i>Pt + Pmh (gr)</i>	311.84	319.87	380.05	323.51	304.33	316.55	377.85	384.32	359.64	318.41	
<i>Pt + Pms (gr)</i>	275.96	283.48	333.48	283.85	261.75	273.96	320.06	325.86	299.8	266.98	
<i>Pw (gr)</i>	35.88	36.39	46.57	39.66	42.58	42.59	57.79	58.46	59.84	51.43	
<i>Pms (gr)</i>	225.89	232.4	270.14	224.42	211.56	219.45	265.65	275.4	250.3	212.94	
<i>W %</i>	15.884	15.658	17.239	17.672	20.127	19.408	21.754	21.227	23.907	24.152	
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>15.771</b>		<b>17.456</b>		<b>19.767</b>		<b>21.491</b>		<b>24.030</b>		
<b><i>ρ<sub>s</sub> (gr/cm<sup>3</sup>)</i></b>	<b>1.460</b>		<b>1.541</b>		<b>1.603</b>		<b>1.605</b>		<b>1.54</b>		

## Figura B 1

Curva de compactación de la muestra patrón M-1



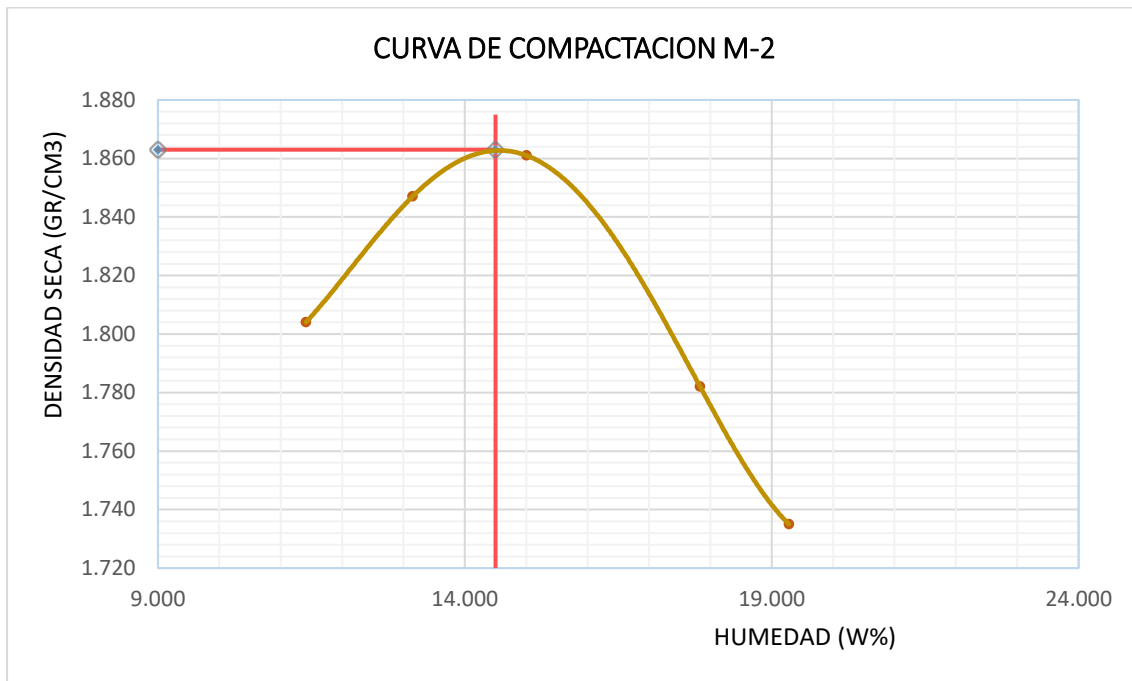
El gráfico muestra la densidad seca máxima  $\rho_{Smax} = 1,610 \text{ g/cm}^3$  y el contenido óptimo de humedad  $W_{opt.} = 20,7 \%$ .

**Tabla B 2***Proctor modificado de la muestra patrón M-2*

<b>ENSAYO:</b>		<b>PROCTOR MODIFICADO M-2</b>									
<b>MOLDE N°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>						
<i>Pmolde (gr)</i>	1794	1794	1794	1794	1794						
<i>Pmolde + Pmh(gr)</i>	3690	3768	3810	3779	3750						
<i>Pmh (gr)</i>	1896	1974	2016	1985	1956						
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944						
<i>ph(gr/cm3)</i>	2.01	2.09	2.14	2.10	2.07						
<b>TARA N°</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	
<i>Pt (gr)</i>	54.53	51.08	55.72	53.16	58.16	58.80	55.08	58.47	57.21	57.27	
<i>Pt + Pmh (gr)</i>	222.59	197.26	331.86	320.86	353.81	317.23	384.74	380.04	321.81	323.97	
<i>Pt + Pms (gr)</i>	204.94	182.67	297.89	291.6	314.1	284.51	335.67	330.57	279.12	280.78	
<i>Pw (gr)</i>	17.65	14.59	33.97	29.26	39.71	32.72	49.07	49.47	42.69	43.19	
<i>Pms (gr)</i>	150.41	131.59	242.17	238.44	255.94	225.71	280.59	272.1	221.91	223.51	
<i>W %</i>	11.735	11.087	14.027	12.271	15.515	14.496	17.488	18.181	19.238	19.324	
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>11.411</b>		<b>13.149</b>		<b>15.006</b>		<b>17.834</b>		<b>19.281</b>		
<b><i>ps (gr/cm3)</i></b>	<b>1.804</b>		<b>1.847</b>		<b>1.861</b>		<b>1.782</b>		<b>1.735</b>		

## Figura B 2

Curva de compactación de la muestra patrón M-2



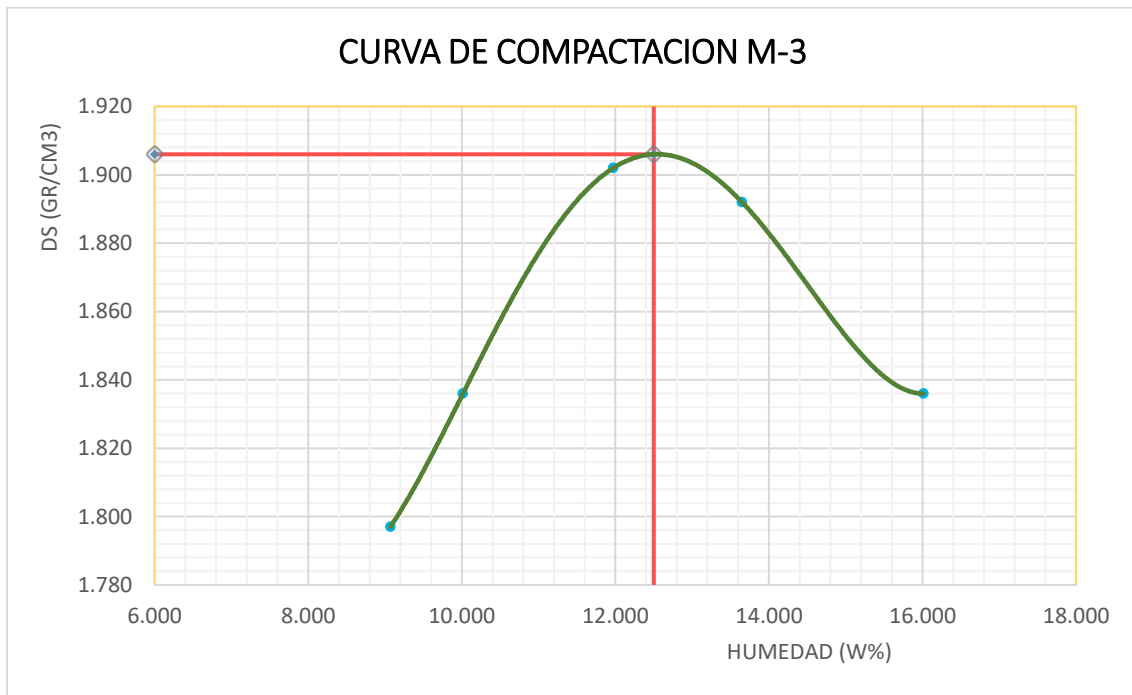
El gráfico muestra los resultados densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad;  $\rho_{Smax} = 1,863 \text{ g/cm}^3$  y  $W_{opt.} = 14,5 \%$ .

**Tabla B 3***Proctor modificado para la muestra patrón M-3*

ENSAYO:		PROCTOR MODIFICADO M-3									
MOLDE N°	1	2	3	4	5						
<i>Pmolde (gr)</i>	1794	1794	1794	1794	1794						
<i>Pmolde + Pmh(gr)</i>	3640	3703	3807	3826	3805						
<i>Pmh (gr)</i>	1846	1909	2013	2032	2011						
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944						
<i>ph(gr/cm3)</i>	1.96	2.02	2.13	2.15	2.13						
TARA N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
<i>Pt (gr)</i>	57.19	55.07	51.09	54.52	50.09	49.51	62.73	54.39	50.17	55.73	
<i>Pt + Pmh (gr)</i>	166.24	218.45	151.95	144.85	237.07	178.4	236.46	216.64	547.24	585.74	
<i>Pt + Pms (gr)</i>	157.53	204.33	142.81	136.59	216.68	164.89	215.45	197.29	479.1	512.08	
<i>Pw (gr)</i>	8.71	14.12	9.14	8.26	20.39	13.51	21.01	19.35	68.14	73.66	
<i>Pms (gr)</i>	100.34	149.26	91.72	82.07	166.59	115.38	152.72	142.9	428.93	456.35	
<i>W %</i>	8.680	9.460	9.965	10.065	12.240	11.709	13.757	13.541	15.886	16.141	
<i>Wprom. (%)</i>	<b>9.070</b>		<b>10.015</b>		<b>11.974</b>		<b>13.649</b>		<b>16.014</b>		
<i>ps (gr/cm3)</i>	<b>1.797</b>		<b>1.836</b>		<b>1.902</b>		<b>1.892</b>		<b>1.836</b>		

### Figura B 3

Curva de compactación de la muestra patrón M-3



El gráfico presenta los resultados del ensayo proctor modificado, densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo;  $\rho_{Smax} = 1,906 \text{ g/cm}^3$  y  $W_{opt.} = 12,5 \%$ .

## Apéndice C. Dosificación de Terrasil para proctor modificado

### DOSIFICACIÓN DE TERRASIL PARA ENSAYO DE C1 (M-1)

Dosis Terrasil	0.5				1				1.5				I /m <sup>3</sup>
Cantidad de Material Suelo	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1800	1800	1800	1800	g
Peso Unitario Suelto	1153	1153	1153	1153	1153	1153	1153	1153	1153	1153	1153	1153	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	%
Humedad de Compactación	18	20	22	24	18	20	22	24	18	20	22	24	%
Agua necesaria	360	400	440	480	360	400	440	480	324	360	396	432	g
Cantidad de Terrasil necesaria a adicionar al agua	<b>0.87</b>	<b>0.87</b>	<b>0.87</b>	<b>0.87</b>	<b>1.73</b>	<b>1.73</b>	<b>1.73</b>	<b>1.73</b>	<b>2.34</b>	<b>2.34</b>	<b>2.34</b>	<b>2.34</b>	<b>g</b>

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{2000}{1153} * 0.5 * 1 \rightarrow T = 0.8673 \text{ (Ecuación 11)}$$

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{2000}{1153} * 1 * 1 \rightarrow T = 1.7346$$

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{1800}{1153} * 1.5 * 1 \rightarrow T = 2.3417$$

### DOSIFICACIÓN DE TERRASIL PARA ENSAYO DE C2 (M-2)

Dosis Terrasil	0.5				1				1.5				l /m <sup>3</sup>	
Cantidad de Material Suelo	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	g
Peso Unitario Suelto	1338	1338	1338	1338	1338	1338	1338	1338	1338	1338	1338	1338	1338	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	%
Humedad de Compactación	12	14	16	18	12	14	16	18	12	14	16	18		%
Agua Necesaria	240	280	320	360	240	280	320	360	240	280	320	360		g
Cantidad de Terrasil necesaria a adicionar al agua	<b>0.75</b>	<b>0.75</b>	<b>0.75</b>	<b>0.75</b>	<b>1.49</b>	<b>1.49</b>	<b>1.49</b>	<b>1.49</b>	<b>2.24</b>	<b>2.24</b>	<b>2.24</b>	<b>2.24</b>		<b>g</b>

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{2000}{1338} * 0.5 * 1 \rightarrow T = 0.7474 \text{ (Ecuación 11)}$$

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{2000}{1338} * 1 * 1 \rightarrow T = 1.4948$$

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{2000}{1338} * 1.5 * 1 \rightarrow T = 2.2422$$



### DOSIFICACIÓN DE TERRASIL PARA ENSAYO DE C3 (M-3)

Dosis Terrasil	0.5				1				1.5				l/m <sup>3</sup>	
Cantidad de Material Suelo	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	g
Peso Unitario Suelto	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	%
Humedad de Compactación	10%	12%	14%	16%	10%	12%	14%	16%	10%	12%	14%	16%	16%	%
Agua Necesaria	200	240	280	320	200	240	280	320	200	240	280	320	320	g
Cantidad de Terrasil necesaria a adicionar al agua	<b>0.79</b>	<b>0.79</b>	<b>0.79</b>	<b>0.79</b>	<b>1.59</b>	<b>1.59</b>	<b>1.59</b>	<b>1.59</b>	<b>2.38</b>	<b>2.38</b>	<b>2.38</b>	<b>2.38</b>	<b>2.38</b>	<b>g</b>

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{2000}{1260} * 0.5 * 1 \rightarrow T = 0.7936 \text{ (Ecuación 11)}$$

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{2000}{1260} * 1 * 1 \rightarrow T = 1.5873$$

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{2000}{1260} * 1.5 * 1 \rightarrow T = 2.381$$

## Apéndice D. Parámetros de compactación adicionando Terrasil

### a. Cálculo para M-1

**Tabla D 1**

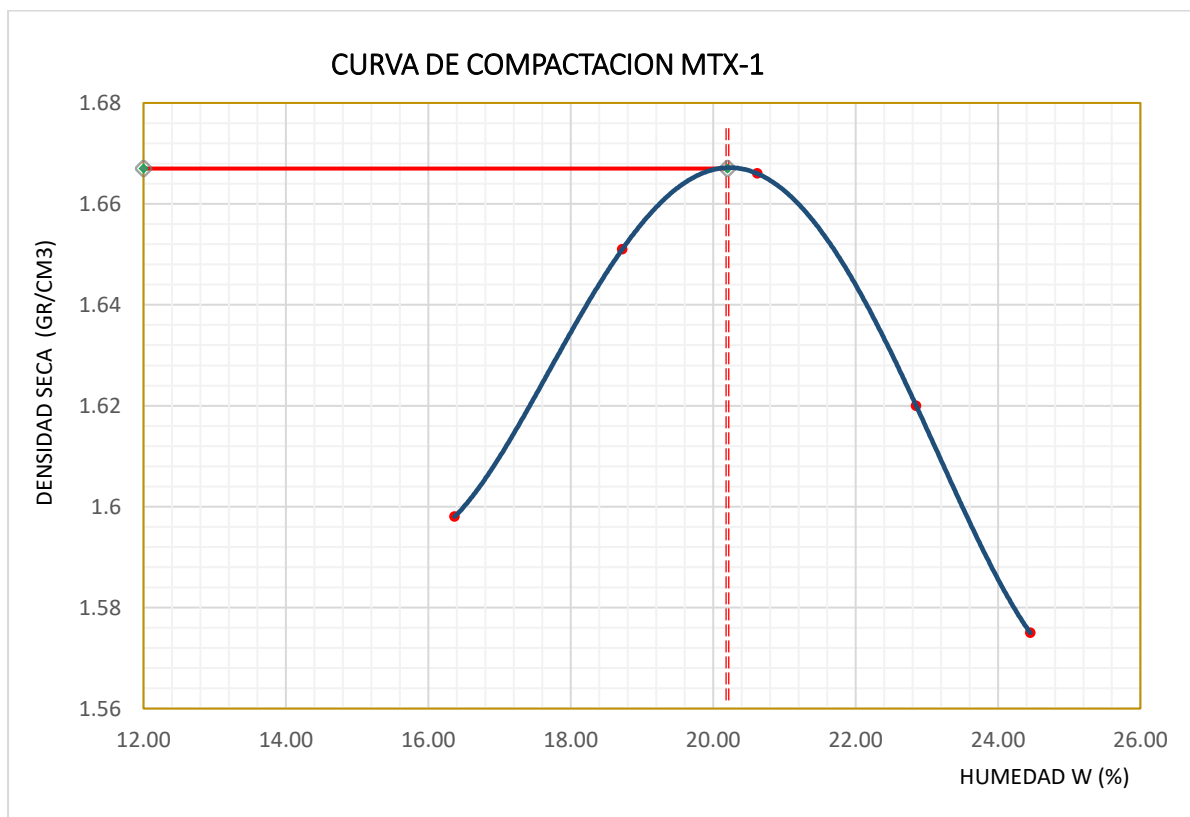
*Proctor modificado de la mezcla MTX-1*

PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLOSO Y TERRASIL MTX-1										
ENSAYO:										
MOLDE N°	1	2	3	4	5					
<i>Pmolde (gr)</i>	1794	1794	1794	1794	1794					
<i>Pmolde + Pmh(gr)</i>	3548	3645	3691	3669	3645					
<i>Pmh (gr)</i>	1754	1851	1897	1875	1851					
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944					
<i>ph(gr/cm3)</i>	1.86	1.96	2.01	1.99	1.96					
TARA N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<i>Pt (gr)</i>	62.72	54.4	59.46	54.08	56.2	58.8	57.21	57.29	58.17	55.09
<i>Pt + Pmh (gr)</i>	352.46	331.83	327.59	320.3	376.36	367.89	388.07	387.74	339.22	367.09
<i>Pt + Pms (gr)</i>	311.88	292.64	284.96	278.66	321.67	315.01	326.44	326.36	284.79	304.91
<i>Pw (gr)</i>	40.58	39.19	42.63	41.64	54.69	52.88	61.63	61.38	54.43	62.18
<i>Pms (gr)</i>	249.16	238.24	225.5	224.58	265.47	256.21	269.23	269.07	226.62	249.82
<i>W %</i>	16.287	16.450	18.905	18.541	20.601	20.639	22.891	22.812	24.018	24.890
<i>Wprom. (%)</i>	<b>16.368</b>		<b>18.723</b>		<b>20.620</b>		<b>22.852</b>		<b>24.454</b>	
<i>ps (gr/cm3)</i>	<b>1.598</b>		<b>1.651</b>		<b>1.666</b>		<b>1.620</b>		<b>1.575</b>	

El cuadro muestra los resultados, contenido de humedad y densidad seca de la mezcla suelo arcilloso M-1 y Terrasil al 0.5lt/m3.

**Figura D 1**

*Curva de compactación de la mezcla MTX-1*



El gráfico muestra el resultado de los parámetros de compactación de la mezcla suelo arcilloso M-1 y Terrasil al  $0.5 \text{ l/m}^3$ , donde:  $\rho_{Smax} = 1.667 \text{ g/cm}^3$  y  $W_{opt.} = 20.2 \%$ .

**Tabla D 2**

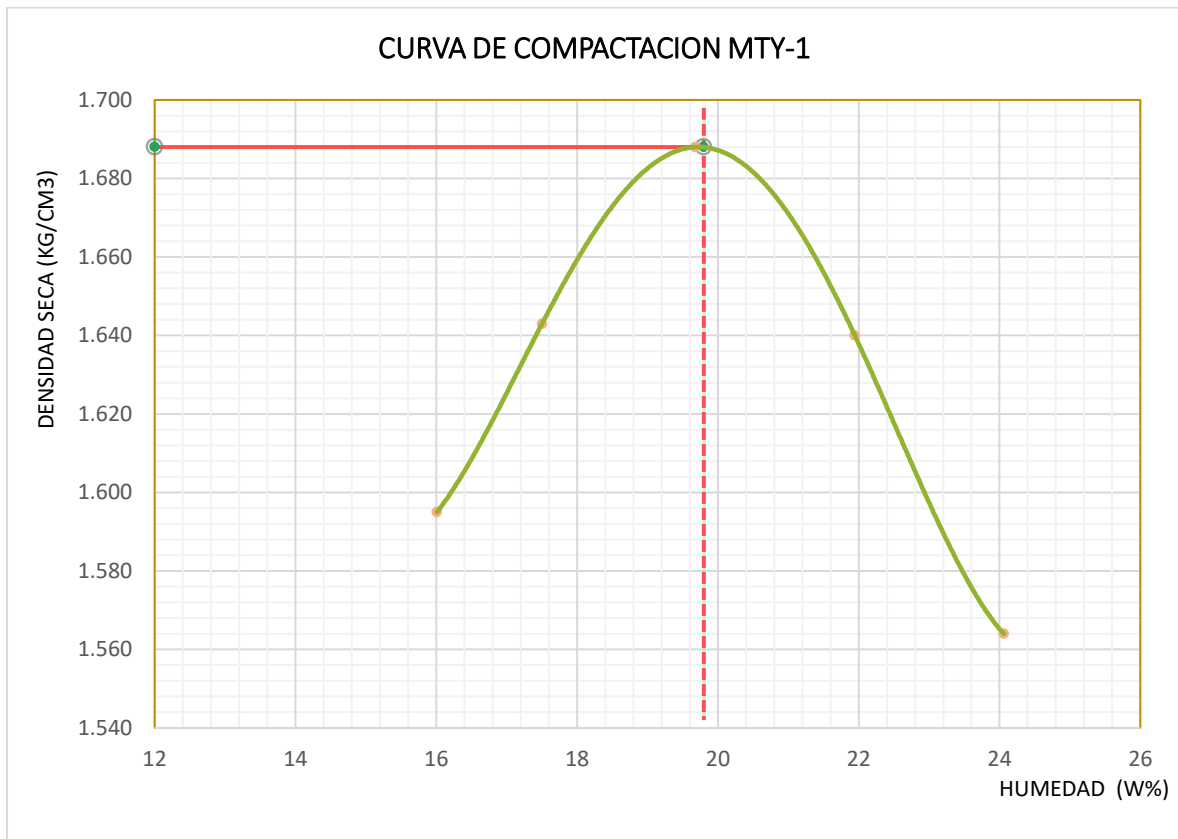
*Proctor modificado de la mezcla MTY-1*

<b>ENSAYO: PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLO Y TERRASIL MTY-1</b>										
<b>MOLDE N°</b>	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>4</b>		<b>5</b>	
<i>Pmolde (gr)</i>	1794		1794		1794		1794		1794	
<i>Pmolde + Pmh(gr)</i>	3542		3617		3702		3684		3621	
<i>Pmh (gr)</i>	1748		1823		1908		1890		1827	
<i>Vmh (cm3)</i>	944		944		944		944		944	
<i>ph(gr/cm3)</i>	1.85		1.93		2.02		2.00		1.94	
<b>TARA N°</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<i>Pt (gr)</i>	50.07	50.45	54.08	58.76	54.43	55.75	56.2	59.44	57.27	56.59
<i>Pt + Pmh (gr)</i>	422.62	394.17	314.32	321.41	360.73	390.44	418.87	377.1	352.21	376.03
<i>Pt + Pms (gr)</i>	370.68	347.22	275.73	282.11	309.9	335.91	353.12	320.36	294.47	314.66
<i>Pw (gr)</i>	51.94	46.95	38.59	39.3	50.83	54.53	65.75	56.74	57.74	61.37
<i>Pms (gr)</i>	320.61	296.77	221.65	223.35	255.47	280.16	296.92	260.92	237.2	258.07
<i>W %</i>	16.20	15.820	17.410	17.596	19.897	19.464	22.144	21.746	24.342	23.780
<i>Wprom. (%)</i>	<b>16.010</b>		<b>17.503</b>		<b>19.680</b>		<b>21.945</b>		<b>24.061</b>	
<i>ps (gr/cm3)</i>	<b>1.595</b>		<b>1.643</b>		<b>1.688</b>		<b>1.64</b>		<b>1.564</b>	

La tabla muestra los resultados, densidad seca y contenido de humedad promedio de la mezcla suelo arcilloso M-1 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>.

## Figura D 2

Curva de compactación de la mezcla MTY-1



El gráfico representa los parámetros de compactación densidad seca máxima  $\rho_{Smax} = 1.688 \text{ g/cm}^3$  y contenido óptimo de humedad  $W_{opt.} = 19.8 \%$  de la mezcla suelo arcilloso M-1 y Terrasil al  $1.00 \text{ l/m}^3$ .

**Tabla D 3**

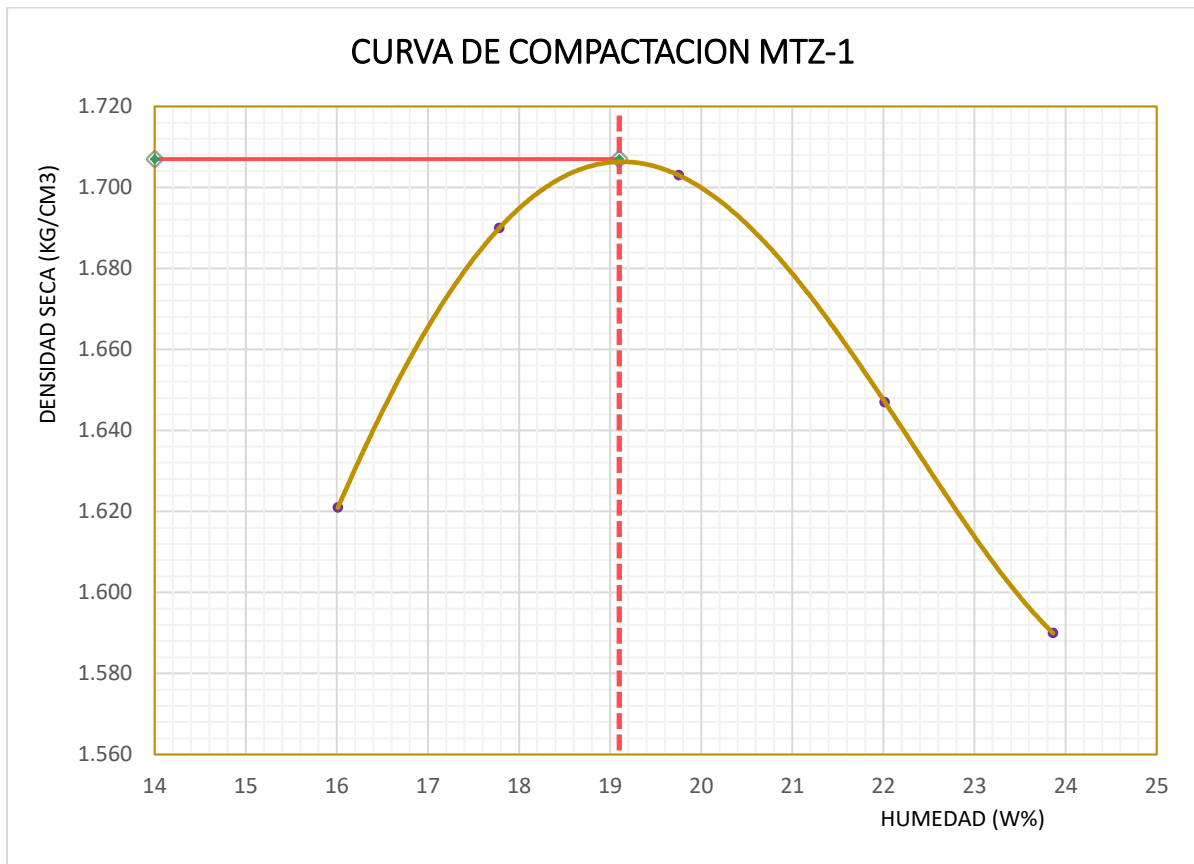
*Proctor modificado de la mezcla MTZ-1*

ENSAYO:		PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLO Y TERRASIL MTZ-1								
MOLDE	1	2	3	4	5					
<i>Pmolde (gr)</i>	1794	1794	1794	1794	1794					
<i>Pmolde + Pmh(gr)</i>	3572	3675	3720	3687	3654					
<i>Pmh (gr)</i>	1778	1881	1926	1893	1846					
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944					
<i>ph(gr/cm3)</i>	1.88	1.99	2.04	2.01	1.97					
TARA N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<i>Pt (gr)</i>	56.57	62.73	56.35	56.11	62.82	59.46	54.43	54.08	56.2	55.75
<i>Pt + Pmh (gr)</i>	368.75	456.81	339.39	366.11	437.85	418.72	453.26	442.61	374.88	430.6
<i>Pt + Pms (gr)</i>	325.44	402.7	296.57	319.39	375.5	359.92	381.94	371.88	313.54	358.32
<i>Pw (gr)</i>	43.31	54.11	42.82	46.72	62.35	58.8	71.32	70.73	61.34	72.28
<i>Pms (gr)</i>	268.87	339.97	240.22	263.28	312.68	300.46	327.51	317.8	257.34	302.57
<i>W %</i>	16.108	15.916	17.825	17.745	19.941	19.570	21.776	22.256	23.836	23.889
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>16.012</b>		<b>17.785</b>		<b>19.755</b>		<b>22.016</b>		<b>23.862</b>	
<b><i>ps (gr/cm3)</i></b>	<b>1.621</b>		<b>1.690</b>		<b>1.703</b>		<b>1.647</b>		<b>1.590</b>	

La tabla contiene los resultados de la densidad seca y el contenido de humedad promedio de la mezcla suelo arcilloso M-1 y Terrasil al 1.50l/m<sup>3</sup>.

### Figura D 3

Curva de compactación de la mezcla MTZ-1



El gráfico representa el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima de la mezcla suelo arcilloso M-1 y Terrasil al  $1.50 \text{ l/m}^3$ , donde:  $\rho_{Smax} = 1.707 \text{ g/cm}^3$  y  $W_{opt.} = 19.1 \%$ .

**b. Cálculo para M-2**

**Tabla D 4**

*Proctor modificado de la mezcla MTX-2*

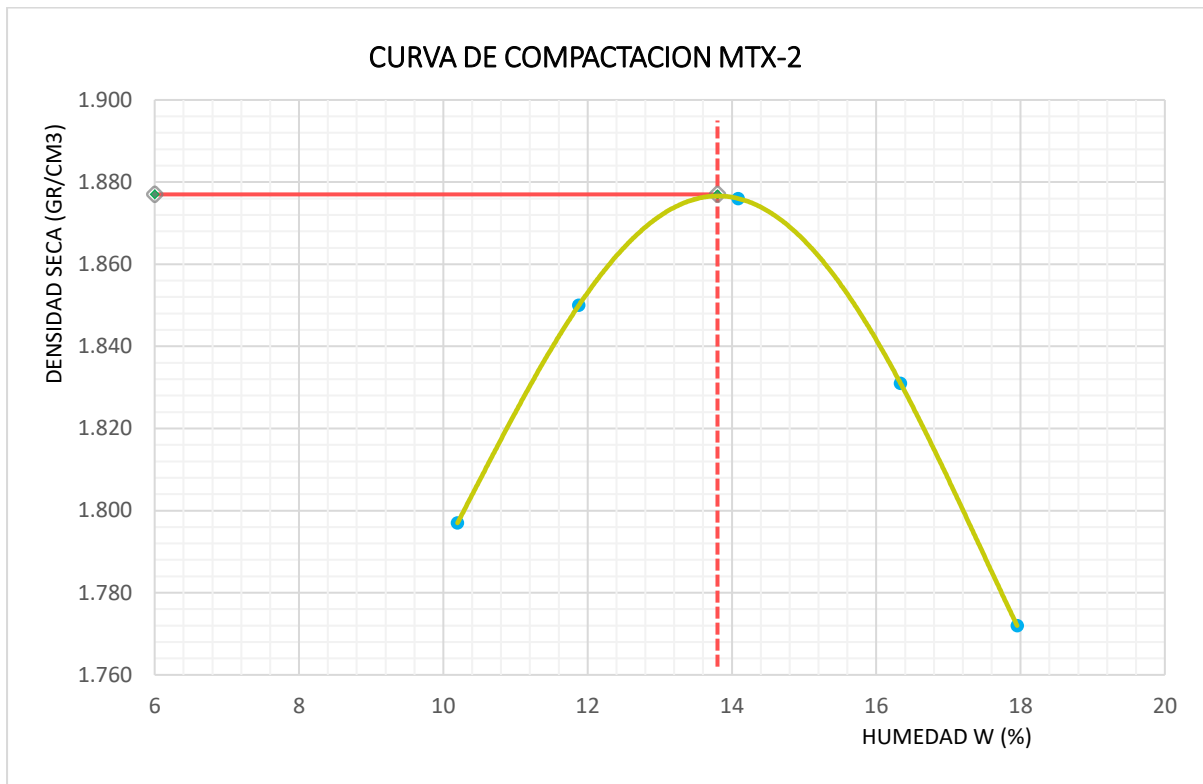
<b>ENSAYO: PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLO Y TERRASIL MTX-2</b>										
<b>MOLDE N°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>					
<i>Pmolde (gr)</i>	1794	1794	1794	1794	1794					
<i>Pmolde + Pmh(gr)</i>	3664	3751	3814	3801	3764					
<i>Pmh (gr)</i>	1870	1957	2020	2007	1970					
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944					
<i>Dh (gr/cm3)</i>	1.98	2.07	2.14	2.13	2.09					
<b>TARA N°</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>
<i>Pt (gr)</i>	62.74	62.82	58.78	55.07	54.03	56.18	58.15	59.44	57.24	62.77
<i>Pt + Pmh (gr)</i>	326.89	332.51	300.7	306.91	350.33	357.23	360.47	347.1	380.51	375.5
<i>Pt + Pms (gr)</i>	303.24	306.75	275.70	279.46	314.74	319.05	317.76	306.95	331.66	327.56
<i>Pw (gr)</i>	23.65	25.76	25.00	27.45	35.59	38.18	42.71	40.15	48.85	47.94
<i>Pms (gr)</i>	240.5	243.93	216.92	224.39	260.71	262.87	259.61	247.51	274.42	264.79
<i>W %</i>	9.834	10.560	11.525	12.233	13.651	14.524	16.452	16.222	17.801	18.105
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>10.197</b>		<b>11.879</b>		<b>14.088</b>		<b>16.337</b>		<b>17.953</b>	
<b><i>ps (gr/cm3)</i></b>	<b>1.797</b>		<b>1.850</b>		<b>1.876</b>		<b>1.831</b>		<b>1.772</b>	

La tabla muestra los resultados de la densidad seca y el contenido de humedad promedio de la mezcla suelo arcilloso M-2 y Terrasil al 0.50 l/m<sup>3</sup>.



### Figura D 4

Curva de compactación de la mezcla MTX-2



El gráfico representa los parámetros de compactación densidad seca máxima  $\rho_{Smax} = 1.877 \text{ g/cm}^3$  y contenido óptimo de humedad  $W_{opt.} = 13.8 \%$  de la mezcla, suelo arcilloso M-2 y Terrasil al  $0.5 \text{ l/m}^3$ .

**Tabla D 5**

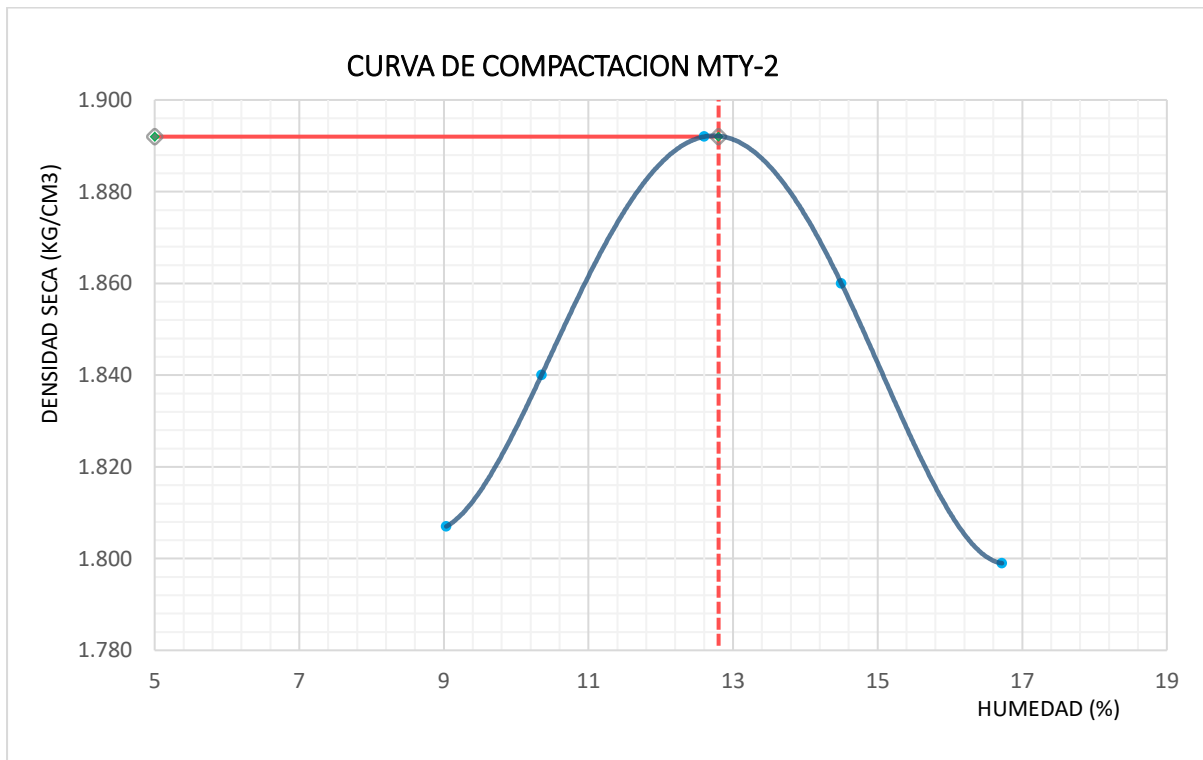
*Proctor modificado del suelo arcilloso y Terrasil MTY-2*

ENSAYO: PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLO Y TERRASIL MTY-2										
MOLDE N°	1	2	3	4	5					
<i>Pmolde (gr)</i>	1794	1794	1794	1794	1794					
<i>Pmolde + Pmh(gr)</i>	3654	3706	3801	3803	3776					
<i>Pmh (gr)</i>	1860	1912	2007	2009	1982					
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944					
<i>Dh (gr/cm3)</i>	1.97	2.03	2.13	2.13	2.1					
TARA N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<i>Pt (gr)</i>	50.19	54.41	49.52	53.03	50.09	51.08	56.12	50.48	54.43	55.72
<i>Pt + Pmh (gr)</i>	273.62	292.22	293.9	265.12	310.65	318.00	389.9	316.84	393.05	391.17
<i>Pt + Pms (gr)</i>	255.41	272.2	270.94	245.26	281.59	288.03	347.15	283.5	344.57	343.09
<i>Pw (gr)</i>	18.21	20.02	22.96	19.86	29.06	29.97	42.75	33.34	48.48	48.08
<i>Pms (gr)</i>	205.22	217.79	221.42	192.23	231.5	236.95	291.03	233.02	290.14	287.37
<i>W %</i>	8.873	9.192	10.369	10.331	12.553	12.648	14.689	14.308	16.709	16.731
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>9.033</b>		<b>10.350</b>		<b>12.601</b>		<b>14.498</b>		<b>16.720</b>	
<b><i>Ds (gr/cm3)</i></b>	<b>1.807</b>		<b>1.840</b>		<b>1.892</b>		<b>1.860</b>		<b>1.799</b>	

La tabla contiene los resultados de la densidad seca y el contenido de humedad promedio de la mezcla suelo arcilloso M-2 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>.

### Figura D 5

Curva de compactación de la mezcla MTY-2



La gráfica representa los parámetros de compactación de la mezcla suelo arcilloso M-2 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>, donde:  $\rho_{Smax} = 1.892 \text{ g/cm}^3$  y  $W_{opt.} = 12.8 \%$ .

**Tabla D 6**

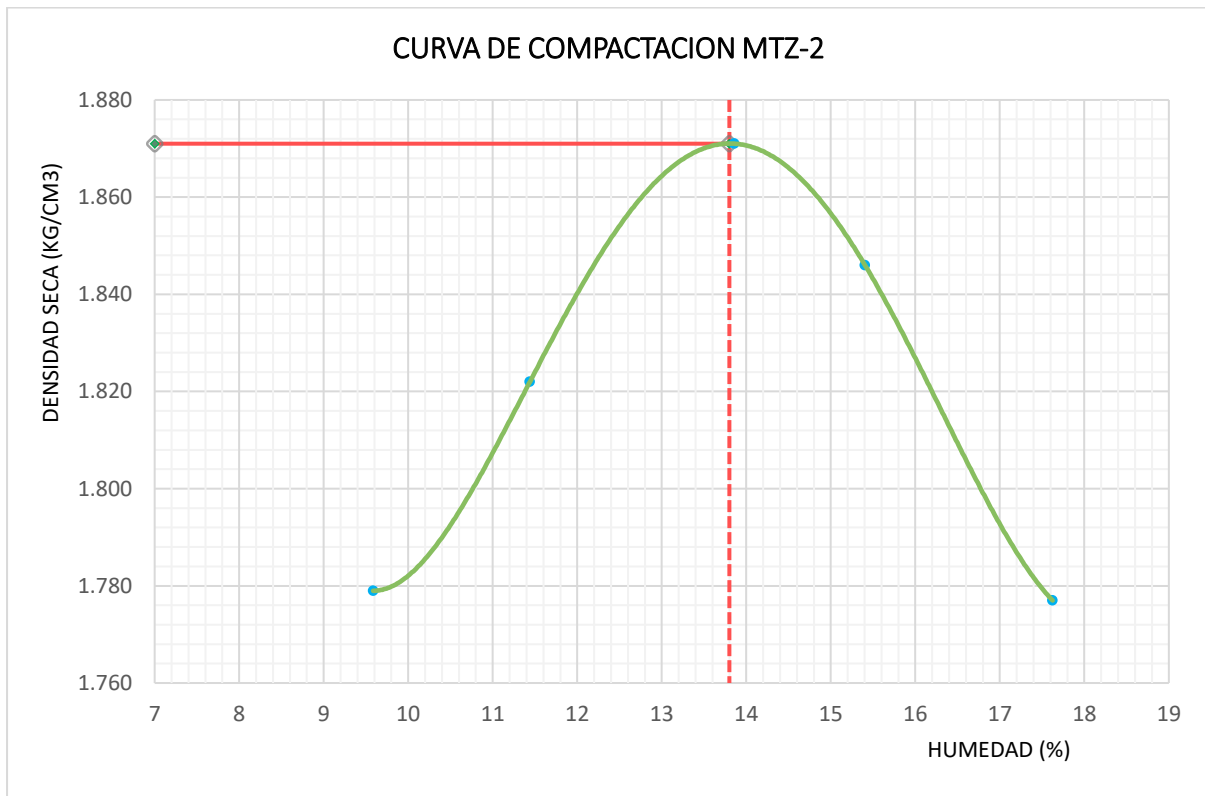
*Proctor Modificado del suelo arcilloso y Terrasil MTZ-2*

ENSAYO: PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLO Y TERRASIL MTZ-2										
MOLDE N°	1	2	3	4	5					
<i>Pmolde (g)</i>	1794	1794	1794	1794	1794					
<i>Pmolde + Pmh(g)</i>	3635	3712	3803	3808	3771					
<i>Pmh (g)</i>	1841	1918	2009	2014	1977					
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944					
<i>ph(g/cm3)</i>	1.95	2.03	2.13	2.13	2.09					
TARA N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<i>Pt (gr)</i>	51.08	54.52	62.75	55.1	58.81	57.28	56.21	59.46	58.15	54.06
<i>Pt + Pmh (g)</i>	283.27	277.92	267.69	296.23	369.35	355.49	367.74	410.44	433.97	426.92
<i>Pt + Pms (g)</i>	262.83	258.5	247.5	270.5	330.72	320.00	326.22	363.51	377.45	371.24
<i>Pw (g)</i>	20.44	19.42	20.19	25.73	38.63	35.49	41.52	46.93	56.52	55.68
<i>Pms (g)</i>	211.75	203.98	184.75	215.4	271.91	262.72	270.01	304.05	319.3	317.18
<i>W %</i>	9.653	9.521	10.928	11.945	14.207	13.509	15.377	15.435	17.701	17.555
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>9.587</b>		<b>11.437</b>		<b>13.858</b>		<b>15.406</b>		<b>17.628</b>	
<b><i>ps (g/cm3)</i></b>	<b>1.779</b>		<b>1.822</b>		<b>1.871</b>		<b>1.846</b>		<b>1.777</b>	

La tabla muestra los resultados de la densidad seca y el contenido de humedad promedio de los cinco especímenes del ensayo para la mezcla, suelo arcilloso M-2 y terrasil al 1.50 l/m<sup>3</sup>.

## Figura D 6

Curva de compactación de la mezcla MTZ-2



La gráfica representa la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad para la muestra de suelo arcilloso M-2 y Terrasil al  $1.50 \text{ l/m}^3$ , donde:  $\rho_{Smax} = 1.871 \text{ g/cm}^3$  y  $W_{opt.} = 13.8 \%$ .

c. Cálculo para M-3

Tabla D 7

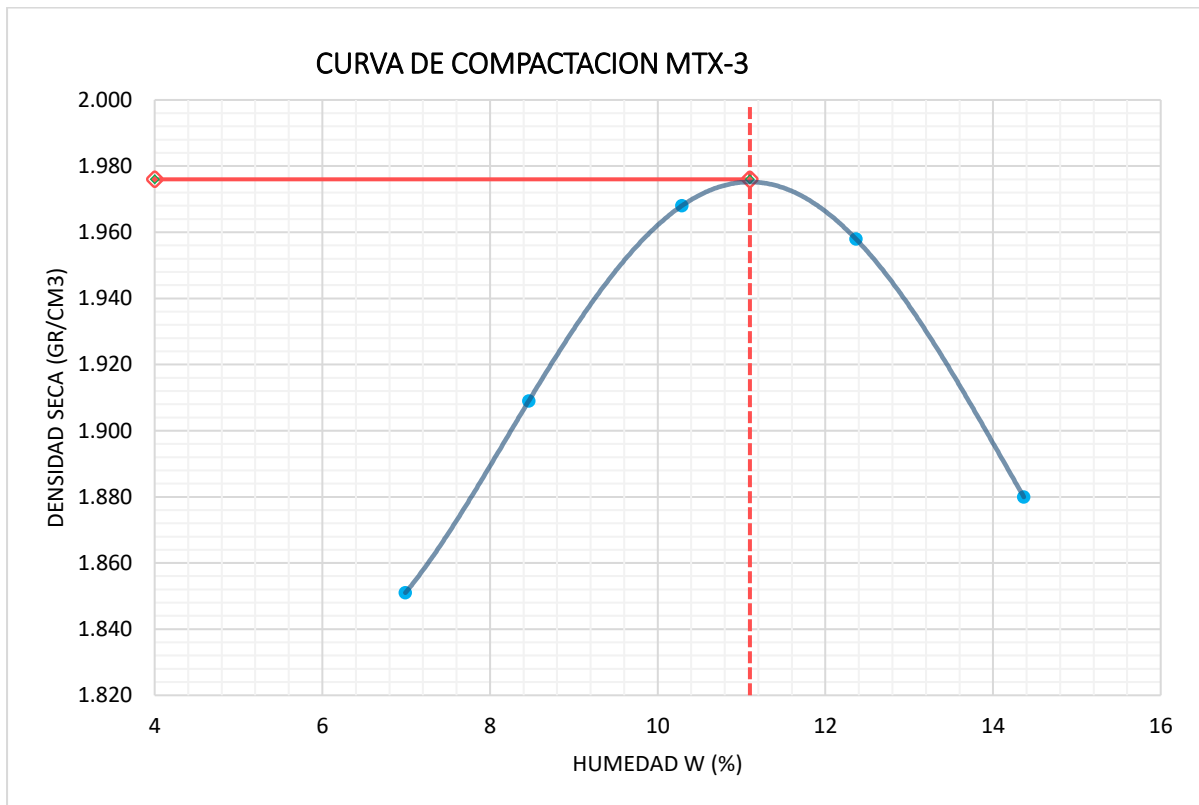
Proctor modificado de la mezcla MTX-3

ENSAYO: PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLO Y TERRASIL MTX-3										
MOLDE N°	1	2	3	4	5					
<i>Pmolde (g)</i>	1794	1794	1794	1794	1794					
<i>Pmolde + Pmh(g)</i>	3664	3745	3847	3870	3828					
<i>Pmh (g)</i>	1870	1951	2053	2076	2034					
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944					
<i>ph(gr/cm3)</i>	1.98	2.07	2.17	2.2	2.15					
TARA N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<i>Pt (gr)</i>	55.71	56.58	62.82	62.73	49.52	51.07	50.08	50.45	56.1	53.02
<i>Pt + Pmh (g)</i>	323.54	361.15	393.43	381.47	352.33	369.29	357.14	377.43	426.95	433.22
<i>Pt + Pms (g)</i>	305.11	342.32	367.37	356.86	324.10	339.59	323.66	341.13	380.4	385.42
<i>Pw (g)</i>	18.43	18.83	26.06	24.61	28.23	29.70	33.48	36.3	46.55	47.80
<i>Pms (g)</i>	249.40	285.74	304.55	294.13	274.58	288.52	273.58	290.68	324.30	332.40
<i>W %</i>	7.390	6.590	8.557	8.367	10.281	10.294	12.238	12.488	14.354	14.380
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>6.990</b>		<b>8.462</b>		<b>10.288</b>		<b>12.363</b>		<b>14.367</b>	
<b><i>ps (g/cm3)</i></b>	<b>1.851</b>		<b>1.909</b>		<b>1.968</b>		<b>1.958</b>		<b>1.880</b>	

La tabla muestra los resultados de la densidad seca y el contenido de humedad promedio de los especímenes del ensayo de la mezcla, suelo arcilloso M-3 y Terrasil al 0.5 l/m<sup>3</sup>.

### Figura D 7

Curva de compactación de la mezcla suelo - Terrasil MTX-3



La grafica representa la densidad seca máxima  $\rho_{Smax} = 1.976 \text{ g/cm}^3$  y el contenido óptimo de humedad  $W_{opt.} = 11.1 \%$  para la mezcla suelo arcilloso M-3 y terrasil al 0.5 l/m<sup>3</sup>.

**Tabla D 8**

*Proctor Modificado de la mezcla MTY-3*

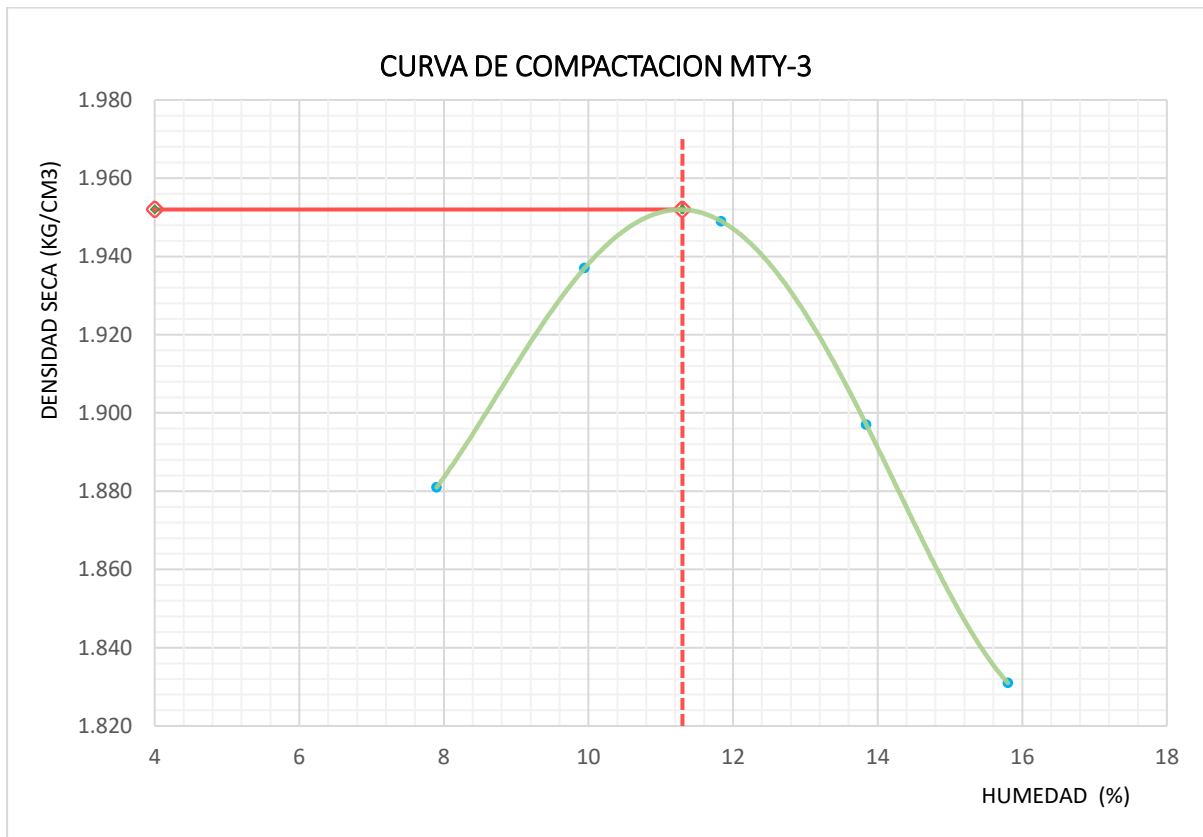
<b>ENSAYO: PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLO Y TERRASIL MTY-3</b>										
<b>MOLDE N°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>					
<i>Pmolde (g)</i>	1794	1794	1794	1794	1794					
<i>Pmolde + Pmh(g)</i>	3723	3805	3850	3837	3796					
<i>Pmh (g)</i>	1929	2011	2056	2043	2002					
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944					
<i>ph(g/cm3)</i>	2.04	2.13	2.18	2.16	2.12					
<b>TARA N°</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>
<i>Pt (gr)</i>	62.7	62.83	57.02	50.18	51.09	53.02	49.53	50.5	54.43	56.11
<i>Pt + Pmh (g)</i>	361.75	347.64	215.78	278.77	390.23	389.81	357.12	349.88	436.09	442.74
<i>Pt + Pms (g)</i>	339.78	326.86	201.33	258.22	354.36	354.14	319.47	313.72	384.36	389.63
<i>Pw (g)</i>	21.97	20.78	14.45	20.55	35.87	35.67	37.65	36.16	51.73	53.11
<i>Pms (g)</i>	277.08	264.03	144.31	208.04	303.27	301.12	269.94	263.22	329.93	333.52
<i>W %</i>	7.929	7.870	10.013	9.878	11.828	11.846	13.948	13.738	15.679	15.924
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>7.900</b>		<b>9.946</b>		<b>11.837</b>		<b>13.843</b>		<b>15.802</b>	
<b><i>ps (g/cm3)</i></b>	<b>1.881</b>		<b>1.937</b>		<b>1.949</b>		<b>1.897</b>		<b>1.831</b>	

La tabla muestra los resultados del ensayo, contenido de humedad promedio y densidad seca para los especímenes de la mezcla suelo arcilloso M-3 y Terrasil al 1.00 l/m<sup>3</sup>.



### Figura D 8

Curva de compactación de la mezcla suelo Terrasil MTY-3



La gráfica representa el contenido óptimo de humedad  $W_{opt.} = 11.3 \%$  y la densidad seca máxima  $\rho_{Smax} = 1.952 \text{ g/cm}^3$  para la mezcla de suelo arcilloso M-3 y Terrasil al  $1.00 \text{ l/m}^3$ .

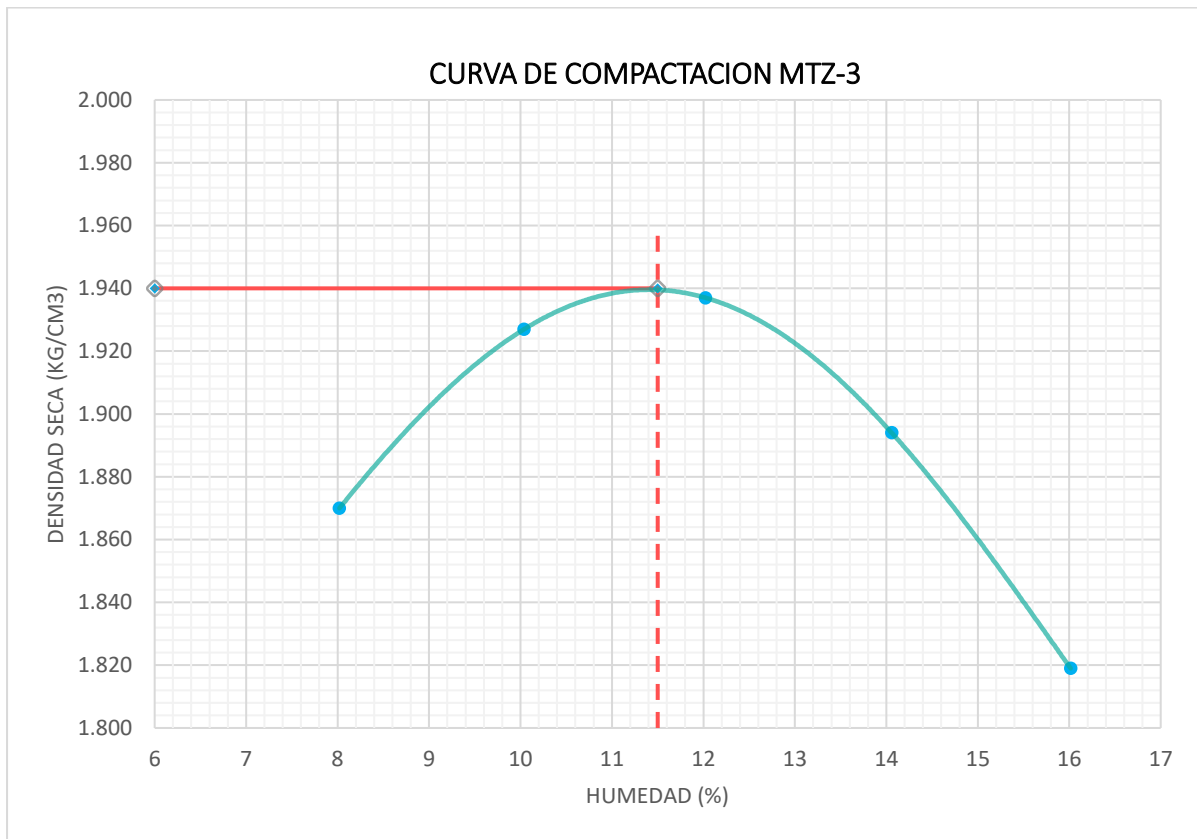
**Tabla D 9***Proctor modificado de la mezcla MTZ-3*

<b>ENSAYO: PROCTOR MODIFICADO DE SUELO ARCILLO Y TERRASIL MTZ-3</b>										
<b>MOLDE N°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>					
<i>Pmolde (g)</i>	1794	1794	1794	1794	1794					
<i>Pmolde + Pmh(g)</i>	3699	3796	3843	3834	3790					
<i>Pmh (g)</i>	1905	2002	2049	2040	1996					
<i>Vmh (cm3)</i>	944	944	944	944	944					
<i>ph(gr/cm3)</i>	2.02	2.12	2.17	2.16	2.11					
<b>TARA N°</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>
<i>Pt (gr)</i>	56.09	51.07	56.38	56.59	54.53	50.09	55.74	53.03	56.21	57.28
<i>Pt + Pmh (g)</i>	281.74	252.4	374.58	364.24	394.1	370.47	354.11	320.72	386.46	371.04
<i>Pt + Pms (g)</i>	265.17	237.29	346.16	335.58	357.08	336.63	317.45	287.62	340.42	328.16
<i>Pw (g)</i>	16.57	15.11	28.42	28.66	37.02	33.84	36.66	33.1	46.04	42.88
<i>Pms (g)</i>	209.08	186.22	289.78	278.99	302.55	286.54	261.71	234.59	284.21	270.88
<i>W %</i>	7.925	8.114	9.807	10.273	12.236	11.810	14.008	14.110	16.199	15.830
<b><i>Wprom. (%)</i></b>	<b>8.020</b>		<b>10.040</b>		<b>12.023</b>		<b>14.059</b>		<b>16.015</b>	
<b><i>ps (g/cm3)</i></b>	<b>1.87</b>		<b>1.927</b>		<b>1.937</b>		<b>1.894</b>		<b>1.819</b>	

La tabla muestra los resultados del ensayo; contenido de humedad promedio y densidad seca para los cinco especímenes de la mezcla suelo arcilloso M-3 y Terrasil al 1.50 l/m<sup>3</sup>.

**Figura D 9**

Curva de compactación de la mezcla MTZ-3



La gráfica muestra el contenido óptimo de humedad  $W_{opt.} = 11.5 \%$  y la densidad seca máxima  $\rho_{Smax} = 1.940 \text{ g/cm}^3$  para la mezcla de suelo arcilloso M-3 y Terrasil al 1.50 l/m<sup>3</sup>.

## Apéndice E. Dosificación de Terrasil para límites de plasticidad

### DOSIFICACIÓN DE TERRASIL PARA ENSAYO DE PLASTICIDAD M-1

Dosis Terrasil	0.5	1	1.5	l/m <sup>3</sup>
Cantidad de Material Suelo	200	200	200	gr
Peso Unitario Suelto	1 153	1 153	1 153	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad natural	0	0	0	%
Humedad de Compactación	30	30	30	%
Agua Necesaria	60	60	60	gr
<b>Cantidad de Terrasil necesaria a adicionar al agua</b>	<b>0,09</b>	<b>0,17</b>	<b>0,26</b>	<b>gr</b>

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{200}{1153} * 0.5 * 1 \rightarrow T = 0.0867 \text{ (Ecuación 11)}$$

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{200}{1153} * 1 * 1 \rightarrow T = 0.1734$$

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{200}{1153} * 1.5 * 1 \rightarrow T = 0.2602$$

### DOSIFICACIÓN DE TERRASIL PARA ENSAYO DE PLASTICIDAD M-2

Dosis Terrasil	0.5	1	1.5	Lt/m <sup>3</sup>
Cantidad de Material Suelo	200	200	200	gr
Peso Unitario Suelto	1 338	1 338	1 338	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad natural	0	0	0	%
Humedad de Compactación	20	20	20	%
Agua Necesaria	40	40	40	gr
<b>Cantidad de Terrasil necesaria a adicionar al agua</b>	<b>0,07</b>	<b>0,15</b>	<b>0,22</b>	<b>gr</b>

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{200}{1338} * 0.5 * 1 \rightarrow T = 0.0747 \text{ (Ecuación 11)}$$

---

### DOSIFICACIÓN DE TERRASIL PARA ENSAYO DE PLASTICIDAD M-3

---

<b>Dosis Terrasil</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>Lt/m3</b>
Cantidad de Material Suelo	200	200	200	gr
Peso Unitario Suelto	1 260	1 260	1 260	Kg/m3
Humedad natural	0	0	0	%
Humedad de Compactación	20	20	20	%
Agua Necesaria	40	40	40	gr
<b>Cantidad de Terrasil necesaria a adicionar al agua</b>	<b>0,08</b>	<b>0,16</b>	<b>0,24</b>	<b>gr</b>

---

$$T = \frac{Q}{PUS} * D * \rho \rightarrow T = \frac{200}{1260} * 0.5 * 1 \rightarrow T = 0.0794 \text{ (Ecuación 11)}$$

## Apéndice F. Cálculo del IG según el IP obtenido con el Terrasil.

El índice de grupo IG de la muestra M-1, mediante la ecuación 8.

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$
$$IG = (90.068 - 35)(0.2 + 0.005(46 - 40)) + 0.01(90.068 - 15)(11 - 10)$$
$$IG = 13.42 \cong 13$$

Para la muestra M-2;

$$IG = (77.038 - 35)(0.2 + 0.005(30 - 40)) + 0.01(77.038 - 15)(6 - 10)$$
$$IG = 3.82 \cong 4$$

Para la muestra M-3;

$$IG = (73.39 - 35)(0.2 + 0.005(24 - 40)) + 0.01(73.39 - 15)(5 - 10)$$
$$IG = 1.69 \cong 2$$

## **ANEXOS**

- Anexo A. Tabla SUCS para clasificación de suelos
- Anexo B. Tabla de clasificación de suelos AASHTO
- Anexo C. Molde para prueba Proctor Modificado
- Anexo D. Ficha Técnica de Terrasil
- Anexo E. Panel Fotográfico
- Anexo F. Constancia de laboratorio

## Anexo A: Tabla SUCS para clasificación de suelos

DIVISIONES PRINCIPALES		SIMBOLOS DEL	NOMBRES TIPICOS	IDENTIFICACION DE LABORATORIO		
<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b>	<b>GRAVAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4.76mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	<b>GW</b> Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200).  Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue  <5% -> GW, GP, SW, SP.  >12% -> GM, GC, SM, SC.  5 al 12% -> casos límite que requieren usar doble símbolo.	Cu=D60/D10 >4 Cc=(D30)²/D10xD60 entre 1 y 3	
			<b>GP</b> Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW	
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	<b>GM</b> Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo		Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP < 4 Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo	
			<b>GC</b> Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla		Límites de Atterberg sobre la línea A con IP > 7	
	<b>ARENAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4.76mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)	<b>SW</b> Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos		Cu=D60/D10 > 6 Cc=(D30)²/D10xD60 entre 1 y 3	
			<b>SP</b> Arenas mal graduadas, arenas con gravas, pocos finos o sin finos		Cuando no se cumplen las condiciones simultáneamente para SW	
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	<b>SM</b> Arenas limosas, mezclas de arena y limo		Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP < 4 Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de doble símbolo.	
			<b>SC</b> Arenas arcillosas, mezclas arena - arcilla		Límites de Atterberg sobre la línea A con IP > 7	
<b>SUELOS DE GRANO FINO</b>	Limos y arcillas: límite líquido menor de 50	<b>ML</b> Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios; arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plasticidad.	<div style="text-align: center;"> <b>Gráfica de plasticidad del USCS</b> </div>			
		<b>CL</b> Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas				
		<b>OL</b> Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas, de baja plasticidad				
	Limos y arcillas: límite líquido mayor de 50	<b>MH</b> Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.				
		<b>CH</b> Arcillas inorgánicas de plasticidad alta				
		<b>OH</b> Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos				
<b>Suelos muy orgánicos</b>		<b>PT</b> Turba y otros suelos de alto contenido orgánico				

Fuente: NTP 339.134, 1999- Archivo:Graficauscs.png



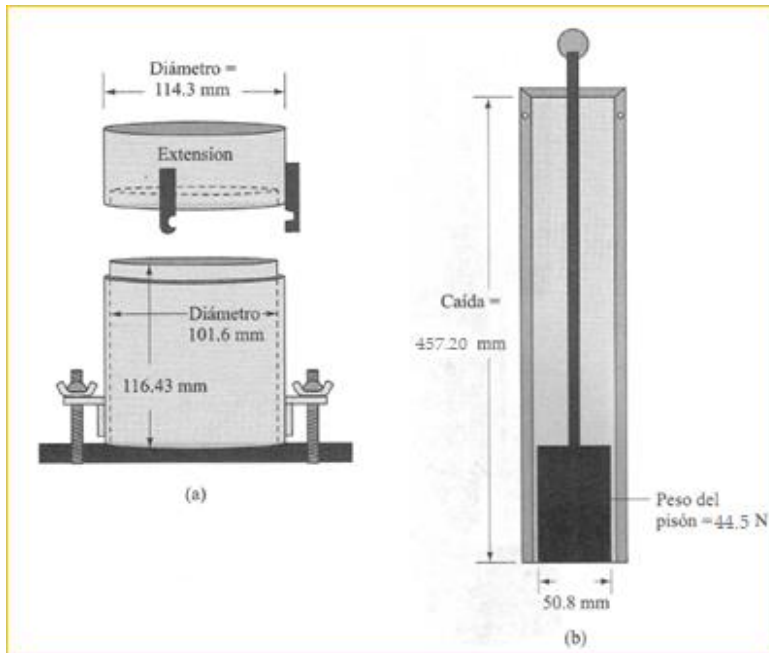
**Anexo B: Tabla de clasificación de suelos AASHTO**

DIVISIÓN GENERAL		Materiales Granulares (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM N° 200)						Materiales Limo - arcillosos (más del 35% por el tamiz ASTM N° 200)					
GRUPO		A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
SUB GRUPO		A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b> (% que pasa por cada tamiz )													
Serie ASTM	N° 10	≤ 50											
	N° 40	≤ 30	≤ 50	≥ 51									
	N° 200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
<b>ESTADO DE CONSISTENCIA</b> (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM N° 40)													
Límite Líquido				NO PLÁSTICO	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41 (IP ≤ LL-30)	≥ 41 (IP > LL-30)
	Índice de plasticidad	≤ 6			≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≥ 11
<b>ÍNDICE DE GRUPO</b>		<b>0</b>		<b>0</b>	<b>0</b>		<b>≤ 4</b>		<b>≤ 8</b>	<b>≤ 12</b>	<b>≤ 16</b>	<b>≤ 20</b>	
<b>TIPOLOGÍA</b> (material más destacado como constituyente)		Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		suelos arcillosos		
<b>CALIDAD</b> (Terreno de fundación)		EXCELENTE A BUENA						ACEPTABLE A MALA					

Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2015)

## Anexo C: Molde para prueba Proctor Modificado

### Molde para Proctor Modificado



Fuente: (Das B. , 2015)

*Nota.* la figura muestra el equipo de ensayo proctor modificado de 4" de diámetro. Adaptado de *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p.53), por B. Das, 2001, Thomson Editores S.A.

## Anexo D: Ficha Técnica de Terrasil



**BREM S.A.C.**  
Environmental Solutions



**ADITIVO**  
ESTABILIZADOR QUÍMICO

### FICHA TÉCNICA

#### Definición

TERRASIL es un aditivo para suelos de última generación, formado al 100% por organosilanos, capaz de repeler el agua, eliminar el hinchamiento y la absorción de suelos. Es, por tanto, un agente impermeabilizante de suelos, que aporta ventajas adicionales a la estabilización tradicional de suelos.

#### Características físicas

Forma	Líquida
Color	Rojizo pálido
Punto de inflamación	> 90 °C (recipiente cerrado)
Punto de ebullición	200°C
Propiedades Explosiva	No Explosivo
Densidad	1,04 g/ml
Viscosidad(25°C)	100-500 cps

**NOTA:** Las características son típicas. Estas pueden variar sin que se vea afectado el desempeño del producto.

#### Dosificación Mezclada

Agua	Terrasil
Necesaria para alcanzar el óptimo de compactación	0,2-2 kg/m <sup>3</sup>

Aplicar en el procedimiento mezclado con el material a estabilizar y en disolución con el agua óptima para alcanzar la densidad máxima.

**Estas son dosificaciones recomendadas. La solución definitiva se obtiene de los ensayos de laboratorio realizados a cada tipo de material, evaluando el coste-beneficio en cada proyecto.**

#### Dosificación Riegos

Agua	Terrasil	Dosificación
300 litros	1 kg	0,01 Kg/m <sup>2</sup>

Aplicar sobre la superficie compactada con 3 l/m<sup>2</sup> de la disolución en dos fases

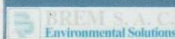
**Estas son dosificaciones recomendadas. La solución definitiva se obtiene de los ensayos de laboratorio realizados a cada tipo de material, evaluando el coste-beneficio en cada proyecto.**

#### Aplicación del sistema



#### Pasos a seguir:

1. Mezcla de Terrasil para impermeabilización de suelo existente. (Siempre que sea posible y se vaya a realizar una recarga u aportación de material)
2. Compactación del terreno existente
3. Riego de la solución 1:300. 3 litros/m<sup>2</sup> en dos fases. RIEGO-SECADO-RIEGO
4. Comprobar impermeabilidad.
5. Comprobación de datos de humedad y características del material a estabilizar
6. Mezcla de Terrasil en el agua necesaria para alcanzar la humedad óptima de compactación.
7. Colocación del material sobre el suelo existente impermeabilizado, si se aporta material o se realiza recarga.
8. Escarificado o reciclado en función de la maquinaria a emplear.
9. Aplicación de la mezcla de agua + Terrasil.
10. Mezclado con el material a estabilizar.
11. Nivelación, bombeos y pendientes.
12. Compactado de la tongada estabilizada.
13. Refinado del material.
14. Compactado al 100%.
15. Riego de sellado 1:300 de Terrasil.
16. Comprobación de impermeabilidad.



Av. Parque de las leyendas N° 210 Ofi. 802 Urb. Pando-San Miguel (51-1) 320 3767  
(51) 971354248 E achavez@brem.com.pe www.brem.com.pe

2015-FTP-02-TER-v03

Fuente: (BREM S.A.C., 2018)



## Beneficios

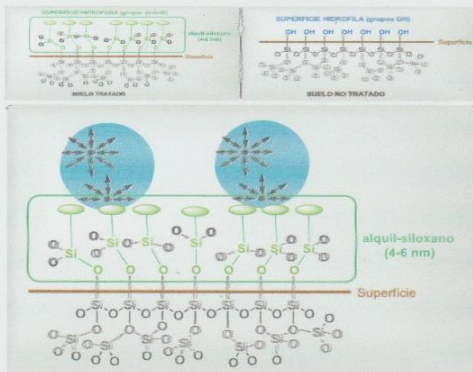
1. El suelo tratado consigue características hidrófobas de forma permanente.
2. El suelo mantiene la transpiración (expulsa el agua en forma de vapor).
3. Reduce el índice de plasticidad de los suelos.
4. Se aumentan los valores de CBR.
5. El Hinchamiento se reduce.
6. Mejora el Módulo Resiliente.
7. Se mejoran los datos de densidad y compactación en obra.
8. Es posible reducir el consumo de agua necesaria para la compactación del material.

## Modo de Acción

Terrasil es un aditivo modificador de suelos compuesto al 100% por organosilanos, soluble en agua, estable al calor y la radiación ultravioleta. Su principal acción, por tanto, consiste en la impermeabilización de suelos y subsuelos.

Posee grupos silanol, que reaccionan con los silicatos presentes en el suelo, transformando su superficie y confiriéndoles propiedades hidrófobas permanentes.

Así, el suelo repelerá las moléculas de agua, impermeabilizándolo y evitando los problemas derivados de la presencia de la misma.



*Repulsión de las gotas de agua sobre la superficie por interacciones desfavorables polar-apolar.*

Debido a la inexistencia de grupos polares en la superficie de los suelos, las gotas de agua no sufren ruptura en sus moléculas constitutivas, al no formarse los enlaces de hidrógeno necesarios para ello. De esta manera, las repulsiones de tipo sustancia polar-sustancia apolar originan que se mantenga la tensión superficial en las gotas de agua, permaneciendo sobre la superficie del suelo.



*Aspecto de gotas de agua depositadas sobre suelos tratados con Terrasil. Como se puede observar, la repelencia de la gota es total.*

## Presentación

La presentación de los productos se realiza en bidones de 20 kg.

## Exposición a la humedad

El producto es reactivo a la humedad. La exposición excesiva a la humedad puede conducir a un aumento de la viscosidad y gelificación.

## Almacenamiento

Almacenar en lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en lugar seco y bien ventilado. Mantener alejado de cualquier material oxidante, inflamable, percloratos, ácido crómico o ácido nítrico.

## Estabilidad del producto mezclado

No almacenar el producto después de la dilución en agua.

## Comprobación del agua y del TerraSil.

Antes de comenzar es necesario comprobar la calidad del agua (TDS hasta 1.000 ppm). Si no requerimos de esta información, hacer una solución de 1 ml de TerraSil de TerraSil y 10 ml de agua para formar una solución transparente.

En caso de que la solución salga blanquecina no proceda a la aplicación y póngase en contacto con el representante de Zydex (Optimasoil).



## Equipo necesario para la aplicación.

Camión cisterna o equipo de agua para hacer la solución.

Cisterna de agua con pulverizador (la cisterna debe estar limpia).

Fuente de Agua Portable (TDS hasta 1000 ppm).

Equipo de seguridad (cascos, chaleco de seguridad..)

## Preparación de la Solución.

Preparar una solución de agua con TerraSil.

Por ejemplo para riegos de impermeabilización se mezclara en la proporción 1 litro de TerraSil cada 300 litros de agua.

Se recomienda llenar el tanque o la cisterna con el agua necesaria y añadir posteriormente la cantidad de TerraSil previamente calculada.

Mezclar con movimiento previo a su aplicación.

## Comprobación de la impermeabilización

Antes de la aplicación comprobar la permeabilidad en una zona mediante el Test de RILEM.

Después del secado realizar el Test de RILEM en la superficie tratada, y observar reducción en la tasa de percolación frente a la primera prueba.

### Test de Rilem

Limpie la superficie

Fijar la arcilla alrededor del tubo RILEM, colocar en superficie de la carretera y presione la arcilla fuertemente

Llenar de agua el tubo RILEM con cuentagotas hasta el nivel. En el caso de aparición de burbujas de aire eliminar por gotero.

Inicie el cronómetro y registrar el tiempo que tarda en bajar el agua por debajo del nivel a partir de los 4 ml.

La duración del ensayo es de 20 minutos después del tratamiento aumentar la duración del ensayo RILEM 1 hora para simular condiciones fuertes lluvias.

## Manipulación segura

Lavar exhaustivamente tras la manipulación.

Evítese el contacto con los ojos y la piel.

Los recipientes que se abren deben volverse a cerrar cuidadosamente y mantener en posición vertical para evitar pérdidas.

**NOTA 1:** En caso de contacto por cualquier vía proporcionar atención médica.

**NOTA 2:** La información e sugerencias son hechas con base en la experiencia e investigaciones realizadas, esto no implica una garantía ya que se recomienda que cada cliente realice las pruebas preliminares.

CONTACTE A SU ASESOR TÉCNICO COMERCIAL.  
CONSULTE LA HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD.



## Anexo E. Panel fotográfico



Fotografía 1. La Tesista realizando el lavado de las muestras



Fotografía 2. Tesista pesando el material retenido en los tamices



**Fotografía 3.** Tesista preparando las muestras, los equipos y herramientas para realizar el ensayo de consistencia



**Fotografía 4.** Realizando el ensayo de limite liquido de las muestras





**Fotografía 5.** Tesista realizando el ensayo de las muestras patrón de proctor modificado



**Fotografía 6.** Agua mezclada con el Terrasil utilizado en la mezcla.





Fotografía 7. Tesista realizando la mezcla de la muestra con el agua y el Terrasil



Fotografía 8. Tesista con la muestra MTZ-2 para ser enrasado.



Fotografía 9. Tesista enrasando la muestra luego del ensayo proctor modificado



Fotografía 10. Tesista registrando el peso de las muestras secas de las muestras compactadas.



**Fotografía 11.** Tesista realizando el ensayo de límite plástico adicionando estabilizante Terrasil en la muestra de la calicata C2.



## Anexo F. Constancia de laboratorio



SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE OBRAS DE INGENIERÍA  
ELABORACIÓN DE PERFILES Y EXPEDIENTES TÉCNICOS  
ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS  
SERVICIO DE TOPOGRAFÍA Y ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS  
CEL. 939291809 / TEL. 076 633319

El sr. Leiner Guerrero Gonzales, identificado con DNI N° 45567546, Gerente General de GUERSAN INGENIEROS S.R.L. con RUC N° 20602101488 y registro INDECOPI N° 00102926, Deja:

### **CONSTANCIA:**

Que, **GARCÍA ROJAS María Fany**, identificada con DNI N° 46067309 bachiller en Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Cajamarca, ha ejecutado todos sus ensayos de laboratorio que corresponden a su proyecto de Tesis: **"Influencia del Terrasil en los parámetros de compactación en suelo arcilloso de baja plasticidad del sector Huacariz, Cajamarca"**, aprobado mediante Resolución de consejo de Facultad N° 0207-2022-FI-UNC, bajo la supervisión del Ingeniero encargado del laboratorio **Jhonny Vásquez Torres** especialista de Mecánica de Suelos y Pavimentos. Los ensayos ejecutados por la Tesista fueron los siguientes:

- Ensayos estándar para clasificar el suelo: Contenido de humedad, Análisis Granulométrico, Límites de Atterberg
- Ensayo de Proctor modificado
- Ensayo de Peso Unitario

Los ensayos fueron realizados desde el 01 de noviembre de 2022 hasta el 31 de enero del 2023.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado, para los fines que estime por conveniente.

Cajamarca, agosto del 2023

Atentamente;

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.  
  
-----  
**Leiner Guerrero Gonzales**  
GERENTE GENERAL

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.  
  
-----  
**Jhonny Vásquez Torres**  
INGENIERO CIVIL  
REG. CIP N° 25574R