

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**“Estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno en
cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la
Pampilla”**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Carlos FALCONI ORÉ

ASESOR:

Msc. Ing. Ángel Hugo VÍLCHEZ PEÑA

AYACUCHO - PERÚ

2024

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres Pelagio Falconi y Yolanda Oré, porque, son la razón de mi existencia, por sus consejos, apoyo incondicional y su paciencia, todo lo que soy es gracias a ellos, a mis hermanos Vilma, Ruddy, Freddy y Nelly, y en especial agradecimiento a mi segundo hermano Ruddy y a la Sra. Adriana Cuba por el tiempo dedicado de toda una vida a la familia Falconi Oré

Agradecimientos

En primer lugar, y, sobre todo, quiero dar gracias a mi familia y en especial a mis padres, quienes, sin escatimar esfuerzo alguno, se han privado gran parte de su vida, para formarnos y educarnos a nosotros, sus hijos. A quienes, la ilusión de su vida, ha sido convertirnos en personas de provecho. Por el sinfín de cosas.....gracias a ustedes les debemos todo.

Quisiera dar las gracias al Msc. Ingeniero Hugo Ángel Vilchez Peña, docente universitario de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, y asesor principal de la presente tesis. Estaré agradecido por los conocimientos y experiencias impartidas.

Al Msc. Ingeniero Hermes Valdivia Aspilcueta, docente y jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos del Departamento de Ordenamiento Territorial y Construcción de la Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM, por el apoyo incondicional en la investigación como Co asesor, ejemplo de dedicación a la noble labor de enseñanza y notable investigador que contribuyó en gran parte del éxito de esta tesis.

A los docentes Msc. Ing. José Ernesto Estrada Cárdenas y Msc. Ing. Hemerson Lizarbe Alarcón, miembros de la comisión revisora de esta tesis, por darse el trabajo y tiempo de revisar, por sus comentarios, sugerencias y por toda la ayuda que me brindaron durante la revisión del borrador de la presente.

Al Msc Ingeniero Cristian Castro Pérez, docente universitario de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, quien logró en mí, la motivación de la pasión de hacer la tesis de investigación, le estoy muy agradecido por la dedicación como docente en la universidad.

Al equipo técnico del Laboratorio de Suelos del Departamento de Ordenamiento Territorial y Construcción de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM conformado por la Ing. Liz Palomino, Ing. Miguel Málaga y en especial agradecimiento al técnico laboratorista Sr. Fortunato Meza Quispe por el apoyo invaluable, lo cual deja ver en ella a una gran persona con el que siempre estaré agradecido.

A la Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM, y en especial agradecimiento al Departamento de Ordenamiento Territorial y

Construcción, por acogerme dentro de sus instalaciones del laboratorio de Mecánica de Suelos para lograr el objetivo de esta investigación.

Al Ministerio de Transportes y Comunicación - MTC, y en especial agradecimiento al Departamento de Provías Nacional y Dirección de Estudios Especiales, que por medio del Ing. Hugo A. Cotos Pérez fueron enriquecidas las inquietudes de las experiencias y estudios del uso del material granular en distintas aplicaciones.

A la empresa T Y R Construcciones y Servicios S.A.C. – Cantera “Gloria”, por la donación del material granular como material seleccionado de préstamo, y a la empresa STASOIL S.A.C. por la donación del aditivo - estabilizador de suelos “TERRAZYME”.

A mis compañeros de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga: Joel Gómez, Heber Guillen, César Villar, Ricardo Quispe, Brysner Casaverde, Raúl Huaracc, Yuri Ayala y a todos en general por compartir muchos momentos universitarios.

A la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil, por acogerme dentro de sus aulas durante mis años de estudiante y donde pase momentos que recordare siempre, de aquellos momentos que no volverán.

Y finalmente, y no menos importante a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi Alma Mater, por haberme permitido ser parte de ella.

Resumen

Se planteó encontrar un tratamiento de mejora de terreno a través de la estabilización de suelos utilizando métodos y tipos de suelos aplicados en estructuras de carreteras pavimentadas y no pavimentadas que reporten un valor de resistencia al corte notable, y tiene por objetivo principal, de determinar y analizar los efectos del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla – Lima, y para ello, se definió y propuso métodos de estabilización como la mecánica o química con un aditivo enzimático “Terrazyme” y tipos de suelos de grano fino CL o suelo granular grueso GM para desarrollar una estabilización de suelos confiable y adecuado para la mejora de suelos, y se evaluó por medio de ensayos geotécnicos de campo, ensayos de mecánica de suelos en el laboratorio de Mecánica de suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, y cálculos geotécnicos. El propósito se logró desarrollando un experimento de análisis de arreglo factorial de los métodos y tipos de suelos con sus respectivas categorías, los cuales conformaron cuatro tratamientos: estabilización mecánica con suelo de grano fino CL, estabilización mecánica con suelo granular grueso GM, estabilización química con aditivo enzimático y suelo de grano fino CL, y estabilización química con aditivo enzimático y suelo granular grueso GM. En la que se evaluó las variables de respuesta de la resistencia al corte y sus respectivos parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno para un tanque de 48.30 m de diámetro y 19.20 m de altura, a través, de mediciones de dos (02) réplicas en especímenes de pruebas de compresión triaxial UU bajo esfuerzos de confinamiento $\sigma_3 = 0.5, 1 \text{ y } 2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$, y, determinándose la mayor significancia en el tratamiento de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y suelo granular grueso GM con un índice CBR que llegó a superar el 150%, y, asimismo, se logró encontrar la geometría de sección óptima de terreno mejorado con el tratamiento de mayor significancia del anillo perimetral de muro de sección trapezoidal (altura $H = 4.50\text{m}$, base mayor $C = 14.25\text{m}$, base menor $a = 3\text{m}$, y pendientes de taludes laterales según norma API 650), y sub rasante circular de 2m de espesor; el cual, cumple satisfactoriamente los criterios de diseño de la capacidad portante con diferencia muy notable y de los asentamientos totales y diferenciales permisibles inmediatos verificados con el programa Plaxis 2D.

Palabras clave: cimentaciones superficiales, estabilización de suelos, resistencia al corte, mejoramiento de terreno, tanques de almacenamiento.

ABSTRACT

It was proposed to find a treatment to improve the terrain through soil stabilization using methods and types of soils applied in paved and unpaved road structures that report a notable shear resistance value, and its main objective is to determine and analyze the effects of the use of different stabilization methods and types of soil on shear resistance for the improvement of land in superficial foundations of hydrocarbon tanks in La Pampilla - Lima, and for this, stabilization methods were defined and proposed such as mechanical or chemical with an enzymatic additive "Terrazyme" and fine-grained soil types CL or coarse granular soil GM to develop a reliable soil stabilization and suitable for soil improvement, and was evaluated by means of geotechnical field tests, of soil mechanics in the Soil Mechanics laboratory of the National Agrarian University La Molina, and geotechnical calculations. The purpose was achieved by developing a factorial arrangement analysis experiment of the methods and types of soils with their respective categories, which formed four treatments: mechanical stabilization with fine-grained soil CL, mechanical stabilization with coarse granular soil GM, chemical stabilization with enzyme additive and fine-grained soil CL, and chemical stabilization with enzyme additive and coarse granular soil GM. In which the response variables of the shear resistance and their respective resistance parameters were evaluated for the improvement of land for a tank of 48.30 m in diameter and 19.20 m in height, through measurements of two (02) replicas. in UU triaxial compression test specimens under confinement stresses $\sigma_3 = 0.5, 1 \text{ y } 2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$, and, determining the greatest significance in the chemical stabilization treatment with Terrazyme enzymatic additive and GM coarse granular soil with a CBR index that exceeded 150%, and, likewise, it was possible to find the optimal section geometry of the improved terrain with the most significant treatment of the perimeter ring of the trapezoidal section wall (height $H = 4.50\text{m}$, larger base $C = 14.25\text{m}$, base less than $= 3\text{m}$, and side slope slopes according to API 650 standard), and circular subgrade 2m thick; which satisfactorily meets the design criteria of the bearing capacity with a very notable difference and the total settlements and immediate allowable differentials verified with the Plaxis 2D program.

Keywords: shallow foundations, soil stabilization, shear resistance, land improvement, storage tanks.

Índice

<i>Dedicatoria</i>	ii
<i>Agradecimientos</i>	iii
Resumen.....	v
Lista de Tablas.....	xi
Lista de figuras.....	xv
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del Problema	1
1.1.1 Antecedentes	1
1.1.2 Descripción	1
1.1.3 Planteamiento del Problema	3
1.2 Delimitación del Problema.....	4
1.2.1 Espacial (Geográfica).....	4
1.2.2 Temporal.....	4
1.2.3 Temática y unidad de análisis	5
1.3 Formulación del Problema	5
1.3.1 Problema General	5
1.3.2 Problemas específicos	5
1.4 Justificación e Importancia	5
1.4.1 Justificación	5
1.4.2 Valor teórico.....	6
1.4.3 Relevancia social	6
1.4.4 Implicaciones prácticas	6
1.4.5 Tecnología	6
1.5 Limitaciones de la Investigación.....	6
1.6 Objetivos.....	7
1.6.1 Objetivo General.	7

1.6.2	Objetivos Específicos.....	7
Capítulo II.....		8
MARCO TEÓRICO.....		8
2.1	Antecedentes.....	8
2.1.1	Investigaciones Internacionales	8
2.1.2	Investigaciones Nacionales.....	10
2.2	Bases Teóricas	14
2.2.1	Teoría de Resistencia al Cortante	14
2.2.2	Teoría de la Capacidad de Carga	14
2.3	Marco Conceptual	17
2.3.1	Suelo.....	17
2.3.1	Cimentación	18
2.3.2	Mejoramiento de Terreno	23
2.3.3	Estabilización de Suelos	24
2.3.4	Estabilización Mecánica.....	25
2.3.5	Estabilización Química.....	25
2.4	Marco Normativo.....	26
2.4.1	Norma Técnica E. 050: Suelos y Cimentaciones.....	26
2.4.2	Norma API 650	26
2.4.3	Norma API 625	27
2.4.4	Norma API 653	27
2.4.5	Manuales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC)	27
Capítulo III.....		28
MATERIAL Y MÉTODOS.....		28
3.1	Enfoque de la Investigación	28
3.2	Alcances de la Investigación	28
3.3	Diseño de la Investigación	28
3.3.1	Descripción experimental.....	29
3.3.2	Diseño del tratamiento	29

3.4	Universo, Población y Muestra.....	30
3.4.1	Universo.....	30
3.4.2	Población.....	30
3.4.3	Muestra.....	30
3.5	Hipótesis:	31
3.5.1	Hipótesis General.....	31
3.5.2	Hipótesis –Específico.....	31
3.6	Operacionalización de variables:.....	32
3.7	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	35
3.7.1	Técnicas de recolección de datos	35
3.7.2	Instrumentos de recolección de datos.....	37
3.7.3	Técnicas estadísticas.....	38
3.8	Desarrollo del trabajo de tesis.....	39
3.8.1	Consideraciones preliminares	39
3.8.2	Mejoramiento de terreno	59
3.8.3	Diseño de la Investigación	64
3.8.4	Mecánica de Suelos.....	68
3.8.5	Capacidad Portante	82
3.8.6	Asentamientos	96
Capítulo IV	.....	115
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	.....	115
4.1	Resultados preliminares del mejoramiento de terreno.....	115
4.1.1	Presentación, análisis y discusiones preliminares.....	115
4.2	Resultados del diseño de investigación.....	118
4.2.1	Presentación, análisis y discusiones en diseño de investigación.....	118
4.3	Resultados de ensayos de mecánica de suelos.....	119
4.3.1	Presentación, análisis y discusiones de EMS en etapa preliminar	119
4.3.2	Presentación, análisis y discusiones de EMS en etapa exploratoria	120
4.3.3	Presentación, análisis y discusiones de EMS en etapa experimental...	124

4.4	Resultados de cálculo de asentamientos	130
4.4.1	Presentación, análisis y discusión del cálculo de asentamientos	130
4.5	Resultados del análisis de datos de la investigación	134
4.5.1	Presentación, análisis y discusión de resistencia al corte.....	134
4.5.1	Presentación, análisis y discusión de parámetros de resistencia	139
4.5.2	Presentación, análisis y discusión de capacidad Portante.....	149
4.5.3	Presentación, análisis y discusión de CBR	153
Capítulo V	.....	155
CONCLUSIONES	.....	155
5.1	Conclusiones generales.....	155
5.2	Conclusiones específicas.....	156
Capítulo VI	.....	158
RECOMENDACIONES	.....	158
6.1	Recomendaciones generales.....	158
6.2	Trabajos futuros	158
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	159
ACRÓNIMOS	.....	164
SÍMBOLOS	.....	166
GLOSARIO	.....	168
ANEXOS	.....	170
7.1	Constancia de certificado de Laboratorio de Mecánica de Suelos.....	170
7.2	Informe técnico del MTC del uso de material de suelo granular	171
7.3	Ensayos estándares realizados.....	173
7.4	Ensayos de índice de calidad de soporte CBR realizados.....	187
7.5	Ensayos de compresión triaxial realizados.....	191
7.6	Especificaciones técnicas de aditivo Terrazyme.....	203
7.7	Asientos totales de modelos representativos de grupos de investigación....	204
7.8	Matriz de Consistencia	208
7.9	Planos geotécnicos	209

Lista de Tablas

Tabla 1: Clasificación de aditivos estabilizadores (según su origen)	26
Tabla 2: Clasificación de aditivos químicos (según el tipo de material).....	26
Tabla 3: Requisitos de cumplimiento de un diseño experimental.....	29
Tabla 4: Cantidad y tipo de estudios de mecánica de suelos (EMS)	31
Tabla 5: Matriz de operacionalización de variable independiente	33
Tabla 6: Matriz de operacionalización de variable dependiente.....	34
Tabla 7: Cantidad y tipos de ensayos del estudio geotécnico.....	42
Tabla 8: Datos técnicos de las estructuras proyectadas	44
Tabla 9: Propiedades de suelos de calicatas C-01,C-02 y C-03 de la zona de estudio de La Pampilla	48
Tabla 10: Propiedades de suelos de calicatas C-04,C-05 y C-06 de la zona de estudio de La Pampilla	48
Tabla 11: Propiedades de suelos de calicatas C-07,C-08 y C-09 de la zona de estudio de La Pampilla	48
Tabla 12: Propiedades de suelos de calicatas del área de influencia del tanque estudiado	49
Tabla 13: Propiedades índice del suelo equivalente homogenizado (mezclado).	51
Tabla 14: Propiedades geotécnicas de suelo granular grueso recomendado	52
Tabla 15: Variantes de categorías de métodos de estabilización de suelos y tipos de suelos según naturaleza de material y métodos específicos del manual del MTC.....	64
Tabla 16: Relación de las variables independientes y sus respectivas categorías	64
Tabla 17: Relación de grupos experimentales (GE) y sus efectos en la variable dependiente	65
Tabla 18: Factor del método de estabilización con sus respectivas categorías	66
Tabla 19: Factor de tipo de suelo con sus respectivos categorías.....	66
Tabla 20: Distribución de arreglo factorial de 2x2 para las variables de respuesta (S_u , C , ϕ).....	68
Tabla 21: Simbología de tipificación para clasificar los suelos según SUCS	70

Tabla 22: Relación de cantidad de ensayos en etapa preliminar	74
Tabla 23: Relación de la cantidad y tipos de ensayos en etapa exploratoria	75
Tabla 24: Relación de la cantidad y tipos de ensayos en etapa experimental	75
Tabla 25: Cantidad de material requerido en ensayo piloto preliminar.....	76
Tabla 26: Cantidad de suelo equivalente mezclado del área de influencia del tanque.	76
Tabla 27: Cantidad de suelo en estrato superior $h = 1.00 @ 1.50$ m en calicata C-04'	77
Tabla 28: Cantidad de suelo en estrato superior $h = 1.50 @ 2.50$ m en calicata C-04'	77
Tabla 29: Cantidad de material de suelo CL en tratamiento de estabilización mecánica	77
Tabla 30: Cantidad de material de suelo CL en tratamiento de estabilización química	78
Tabla 31: Cantidad de material de suelo GM en tratamiento de estabilización mecánica	78
Tabla 32: Cantidad de material de suelo GM en tratamiento de estabilización química	78
Tabla 33: Densidad máxima seca de suelos en estudio	79
Tabla 34: Parámetros físicos de suelo fuerte y débil, según la ilustración	88
Tabla 35: Recomendaciones de tipos de cimentaciones en tanques.....	90
Tabla 36: Descripción del pre dimensionamiento de la cimentación propuesta con suelo mejorado	91
Tabla 37: Datos de cargas de servicio de la estructura del tanque proyectado	96
Tabla 38: Modos de asentamientos de cimientos de tanques por diferentes estándares.	98
Tabla 39: Asentamiento circunferencial diferencial permitido	99
Tabla 40: Asentamientos diferencial de centro a borde (pandeo)	100
Tabla 41: Asentamientos permisibles para diámetros de tanque de 20m, 50m y 100m	100
Tabla 42: Asiento total determinado a partir de asientos diferenciales según normas y autores	101
Tabla 43: Valores o rango de valores para la relación de Poisson	102

Tabla 44: Comparación de asientos en tanques entre solución analítica y resultados de PLAXIS.	103
Tabla 45: Características generales del estrato superior idealizado	106
Tabla 46: Características específicas del estrato superior idealizado	107
Tabla 47: Características generales del estrato inferior del terreno idealizado	107
Tabla 48: Características específicas de capa inferior de terreno idealizado.....	108
Tabla 49: Características generales del estrato de suelo CL compactado (GE-01) ...	108
Tabla 50: Características específicas del estrato de suelo mejorado (GE-01)	109
Tabla 51: Características generales del estrato de suelo mejorado (GE-02)	109
Tabla 52: Características específicas del estrato de suelo mejorado (GE-02)	110
Tabla 53: Características generales del estrato de suelo mejorado (GE-03)	110
Tabla 54: Características específicas del estrato de suelo mejorado (GE-03)	111
Tabla 55: Características generales del estrato de suelo mejorado (GE-04)	111
Tabla 56: Características específicas del estrato de suelo mejorado (GE-04)	112
Tabla 57: Carga distribuida de diseño en modelo de PLAXIS 2D	112
Tabla 58: Descripción de las coordenadas de los puntos de medición de desplazamientos	114
Tabla 59: Relación de tratamientos de mejora de suelos	117
Tabla 60: Relación de los grupos de investigación	118
Tabla 61: Diseño factorial 2x2 definido.....	118
Tabla 62: Propiedades índice de suelo equivalente mezclado	120
Tabla 63: Verificación de propiedades geotécnicas de suelo crítico.	121
Tabla 64: Parámetros elásticos y de resistencia al corte de suelo de grano fino CH (calicata C-04')	122
Tabla 65: Propiedades geotécnicas de los grupos experimentales (GE).	124
Tabla 66: Cuadro comparativo de propiedades de los grupos de investigación (GE y GC)	125
Tabla 67: Parámetros elásticos y de resistencia al corte del grupo experimental GE-01	125

Tabla 68: Parámetros elásticos y de resistencia al corte del grupo experimental GE-02	126
Tabla 69: Parámetros elásticos y de resistencia al corte del grupo experimental GE-03	126
Tabla 70: Parámetros elásticos y de resistencia al corte del grupo experimental GE-04	126
Tabla 71: Asentamiento total permisible determinado a partir del asiento diferencial	131
Tabla 72: Asientos del modelo de terreno sin mejoramiento de suelo.	132
Tabla 73: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección trapezoidal (C=18m,a=3m,H=6m y e=2m subrasante)	132
Tabla 74: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección trapezoidal (C=13m,a=3m,H=4m y e=2m subrasante)	132
Tabla 75: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección cuadrada (A=6m,H=6m y e=2m subrasante)	133
Tabla 76: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección cuadrada (A=4m,H=4m y e=2m subrasante)	133
Tabla 77: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección trapezoidal (C=14.25m,a=3m,H=4.50m y e=2m subrasante).....	133
Tabla 78: Arreglo factorial 2x2 de variable de respuesta de la resistencia al corte. ...	135
Tabla 79: Regresión factorial de resistencia al corte vs. estabilización, suelos.....	135
Tabla 80: Arreglo factorial 2x2 de variable de respuesta de la cohesión.	140
Tabla 81: Regresión factorial de cohesión vs. estabilización, suelos	141
Tabla 82: Arreglo factorial 2x2 de variable de respuesta del ángulo de fricción.....	144
Tabla 83: Regresión factorial de ángulo de fricción vs. estabilización, suelos	145
Tabla 84: Capacidad de carga de suelo débil en GC.....	150
Tabla 85: Capacidad de carga de estratos fuertes en GE	150
Tabla 86: Valores de condición de suelo fuerte sobre suelo débil	151
Tabla 87: Valores de capacidad portante de los grupos de investigación CG y GE...151	
Tabla 88: Índice CBR de los grupos de investigación (GC y GE)	153
Tabla 89: Categorías de Sub rasante	154

Lista de figuras

Figura 1: Tipos de falla en cimentación superficial	15
Figura 2: Plano de falla de corte en cimentación superficial	16
Figura 3: Cimentación superficial	19
Figura 4: Diagrama de Fenómenos en una Cimentación.....	19
Figura 5: : Ejemplo de detalle de muro de anillo de concreto como cimentación	21
Figura 6: Ejemplo de cimentación de tierra con muro de anillo con piedra triturada y grava.....	22
Figura 7: Mejoramiento de terreno a través de las estabilización mecánica en la Obra: " Mejoramiento de la capacidad resolutive del hospital regional Miguel Ángel Mariscal Llerena"	24
Figura 8: Vista en planta del terreno de la Refinería La Pampilla	39
Figura 9: Estudio de refracción sísmica (lado izquierdo) y sondaje eléctrico vertical (lado derecho).....	40
Figura 10: Ensayo de perforación diamantina P-3 y su testigo extraído	41
Figura 11: Ensayos de excavación directa de calicatas C-2 y C-10.....	41
Figura 12: Rango de aplicación de técnicas de mejoramiento en función al tipo y tamaño de suelo	46
Figura 13: Vista de plano geotécnico con ubicación de calicatas en área de influencia del tanque	49
Figura 14: Muestras representativas y mezclado del suelo equivalente	50
Figura 15: Ensayo granulométrico de suelo granular grueso GM	68
Figura 16: Ensayo de límite líquido y límite plástico	69
Figura 17: Ensayo de densidad natural de campo en etapa exploratoria.....	69
Figura 18: Gráfica de plasticidad	70
Figura 19: Ensayo Proctor modificado previo curado del suelo granular GM.....	70
Figura 20: Ensayos de gravedad específica para un suelo de grano fino CL	71
Figura 21: Ensayos CBR y saturación antes de ejecutar la prueba	71
Figura 22: Diagrama de prueba de ensayo triaxial	72

Figura 23: Ensayo de compresión triaxial UU para un suelo granular grueso GM.	73
Figura 24: Calicata C-04' ubicada en área de influencia del tanque proyectado.....	80
Figura 25: Adquisición de material de suelo granular de la cantera Gloria.	81
Figura 26: Desmenuzado y secado del suelo de grano fino CL.	81
Figura 27: Almacenamiento de material granular restante y secado.	82
Figura 28: Secado en horno ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) y almacén de suelo de grano fino CL en bolsa hermética.	82
Figura 29: Vista en planta del área de influencia del tanque residual.	83
Figura 30: Perfil estratigráfico geotécnico del corte A-A focalizado en el área de influencia del tanque residual	84
Figura 31: Perfil estratigráfico geotécnico de corte A'- A' del área de influencia de tanque residual.	85
Figura 32: Capacidad portante de una cimentación continua sobre suelo estratificado de suelo más fuerte sobre débil: (a) H pequeña; y (b) H grande.	87
Figura 33: Correlación de coeficiente de punzonamiento K_s	89
Figura 34: Correlación de variación basada en la teoría de Meyerhof y Hanna	89
Figura 35: Modelo idealizado (homogenizado), del terreno en su condición crítica (grupo de control GC).....	92
Figura 36: Modelo idealizado de suelo de estrato fuerte sobre suelo débil (anillo de sección trapezoidal).	93
Figura 37: Modelo idealizado de suelo de estrato fuerte sobre suelo débil (anillo de sección cuadrada).....	93
Figura 38: Detalle de sección anular trapezoidal de suelo mejorado recomendado por norma API 650.	94
Figura 39: Detalle de sección anular cuadrada como alternativa de suelo mejorado...95	
Figura 40: Inclinación del plano de falla en suelo con plano principal mayor a la izquierda y círculo de Mohr y envolvente de falla a la derecha	96
Figura 41: Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas	97
Figura 42: Modos de asentamiento del tanque.....	98
Figura 43: Módulo esfuerzo deformación tangente inicial y módulo secante	101

Figura 44: Diagrama del módulo secante E_{50}	102
Figura 45: Modelo geométrico de terreno sin mejor en el programa Plaxis 2D	104
Figura 46: Modelo geométrico de terreno mejorado con anillo de sección trapezoidal	104
Figura 47: Modelo geométrico de terreno mejorado con anillo de sección cuadrada.	105
Figura 48: Nombres de los materiales de los estratos en el modelo de PLAXIS.....	106
Figura 49: Ubicación de puntos en modelo de terreno sin mejora (grupo de control - GC)	114
Figura 50: Ubicación de puntos en modelo de terreno con mejora de suelo (GE) con anillo de sección trapezoidal.	114
Figura 51: Ubicación de puntos en modelo de terreno con mejora de suelo (GE) con anillo de sección cuadrada.	114
Figura 52: Especímenes de suelo de grano fino CH (suelo crítico – GC), fallados por abultamiento.....	123
Figura 53: Especímenes de suelo de grano fino CL (C-04'), fallados por abultamiento	123
Figura 54: Diagrama de propiedades geotécnicas del grupo de control y experimental.	127
Figura 55: Probetas de ensayo triaxial UU (GE-01) con tres tipos de modo de falla para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2 kg/cm^2 en ese orden de izquierda a derecha de la figura.....	129
Figura 56: Probetas de ensayo triaxial UU (GE-03) con modo de falla por corte para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2 kg/cm^2 en ese orden de izquierda a derecha de la figura.....	129
Figura 57: Probetas de ensayo triaxial UU (GE-02) con modo de falla por corte para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2 kg/cm^2 en ese orden de izquierda a derecha de la figura.....	130
Figura 58: Probetas de ensayo triaxial UU (GE-04) con modo de falla por corte para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2 kg/cm^2 en ese orden de izquierda a derecha de la figura.....	130
Figura 59: Modo de asentamiento de fondo focalizado	131
Figura 60: Diagrama de Pareto de variable de respuesta de resistencia al corte	136
Figura 61: Gráfica de efectos principales de variable de respuesta de resistencia al corte	136

Figura 62: Gráfico de interacción de efectos principales de variable de respuesta de resistencia al corte	137
Figura 63: Gráfica de cubos de la variable resistencia al corte	137
Figura 64: Gráfica de residuos para la resistencia al corte	138
Figura 65: Diagrama de barras de resistencia al Corte en grupos de investigación....	139
Figura 66: Diagrama de Pareto de variable de respuesta de la cohesión	141
Figura 67: Gráfica de efectos principales de variable de respuesta de la cohesión ...	142
Figura 68: Gráfico de interacción de efectos principales de variable de respuesta de la cohesión.....	142
Figura 69: Gráfica de cubos de la variable de la cohesión.....	143
Figura 70: Gráfica de residuos para la variable de la cohesión	143
Figura 71: Diagrama de Pareto de variable de respuesta del ángulo de fricción	145
Figura 72: Gráfica de efectos principales de variable de respuesta del ángulo de fricción	146
Figura 73: Gráfico de interacción de efectos principales en el ángulo de fricción	146
Figura 74: Gráfica de cubos de la variable angulo de fricción.....	147
Figura 75: Gráfica de residuos para el ángulo de fricción	147
Figura 76: Diagrama de barras de capacidad portante (T_n/m^2) para los grupos de investigación	152
Figura 77: Diagrama de barras de Índice CBR de grupos de investigación	154

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del Problema

1.1.1 Antecedentes

La presencia de suelos desfavorables de diversas índoles, en las cimentaciones de estructuras ingenieriles como en cualquier parte de la corteza terrestre, genera la necesidad de encontrar algún tratamiento adecuado como la técnica de estabilización de suelos u otros métodos para el mejoramiento de terreno; así, como lo identificado en el terreno del área de estudio de la Pampilla - Lima, y según el informe (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017), se tiene que el terreno presenta características críticas con una distribución errática y aleatoria a nivel vertical (estratigráfico) y superficial con un conglomerado fluvioaluvional de depósito de sedimentos finos y gruesos formando pequeños estratos y lentes compuestos por limos arenosos, arenas limosas, gravas arenosas, limosas y también finos plásticos compresibles; y, recomienda un tratamiento de mejora de suelos a través de la estabilización mecánica por sustitución con material de suelo granular grueso del tipo GM para la cimentación de tanques de almacenamiento de hidrocarburos.

La selección idónea del uso de los distintos tratamientos de técnicas de mejoramiento de terreno, como la estabilización de suelos u otras, para las cimentaciones de estructuras ingenieriles como vías de transporte, edificios, puentes y otros han sido un problema latente desde tiempos muy remotos para la humanidad, y ante ello, existen vestigios de importantes aportes de tratamientos de mejora de suelos, con métodos, desde los más ancestrales y elementales, correspondientes a las primeras civilizaciones, como el apisonado con ganado de las vías, hasta el más reciente método existente, como es el uso de agentes estabilizadores de suelos que controlan e incrementan las propiedades de los suelos críticos.

1.1.2 Descripción

Los diseños ineficientes de las cimentaciones de tanques superficiales en suelos difíciles o suelos blandos de baja capacidad de carga traen como consecuencia problemas de daños estructurales por fallas por corte en los cimientos y posibles asentamientos diferenciales y totales en los suelos mejorados, y, por ende, requiere de reparaciones, modificaciones o reconstrucciones previo desmantelamiento, que

significan sobre costos para la entidad pública o privada. Por lo tanto, una de las alternativas de solución al problema consiste en diagnosticar e identificar el tipo de suelo crítico con un buen estudio geológico y geotécnico, y evaluar una adecuada técnica de algún método de mejoramiento de terreno, con un propósito único de “interés principal, que es la identificación de medios para obtener un aumento significativo en la capacidad de carga de un suelo. Esto se puede lograr alterando las propiedades del suelo de “ ϕ ”, cohesión “c”, densidad “ ρ ”, (Bowles J. E., 1997, pág. 344)”.

1.1.2.1 Descripción Mundial:

A nivel internacional, la presencia de problemas en cimentaciones de suelos mejorados, a través, de la estabilización en suelos de baja densidad y de baja capacidad de carga para estructuras de tanques de almacenamiento de hidrocarburos o líquidos en general, es muy usual, debido al crecimiento demográfico, extensión urbana de las ciudades y entre otros, que demandan su ocupación en gran extensión de terrenos poco apropiados para la construcción de cualquier estructura y ameritan tratamientos respectivos de mejora de suelos para cada uno de ellos, y más aún, en los países de gran expansión urbana e industrializada.

1.1.2.2 Descripción Nacional:

En nuestro ámbito nacional, del mismo modo, la probabilidad de problemas en cimentaciones de suelos mejorados, a través, de la estabilización en terrenos de suelos de baja densidad y de baja capacidad de carga en este tipo estructuras, es latente, debido a que éstos ocupan zonas de expansión urbana con apariencia de presencia de suelos difíciles; así, como por ejemplo, las refinerías de procesamiento, producción y almacenamiento de derivados del petróleo en el País, como La Pampilla (Ventanilla, Callao), Talara (Piura), Conchán (Lurín), Iquitos (Loreto), el Milagro (Amazonas), Pucallpa (Ucayali), y Shivityacu (Loreto), que se encuentran en las periferias de las ciudades y requieren de su atención para el mejoramiento de terreno.

De otro lado, en el sector transportes, es muy usual el problema descrito anteriormente, y que a través del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se tienen normas y manuales con el fin de estandarizar los métodos y procedimientos de mejora de suelos; y, específicamente, se tiene amplia variedad en la técnica de estabilización de suelos, con dos métodos generales muy diferenciados en categorías como la mecánica y química; y éstas están asociadas a diferentes tipos de suelos y tipos de agentes estabilizantes (aditivos), y que son aplicados en vías asfaltadas y no asfaltadas. De los cuales, se derivan en métodos particulares como (Sección Suelos y Pavimentos - MTC,

2014, pág. 92) los tipifica en “estabilización por sustitución de suelos, estabilización mecánica de suelos, por combinación de suelos, suelos estabilizados con cal, cemento, escorias, emulsión asfáltica, estabilización química del suelo, estabilización con geosintéticos (geotextiles, geomallas u otros)”.

1.1.2.3 Descripción Local:

La presencia de este tipo de problema de cimentaciones en la región de Ayacucho no se tiene identificada actualmente, porque no existen estructuras de almacenamiento del tipo industrializado de ningún tipo; sin embargo, en el sector transportes se tienen los mismos alcances descritos en el ámbito nacional.

1.1.3 Planteamiento del Problema

La existencia de suelos de baja resistencia, densidad y de condición crítica en cimentaciones superficiales para tanques de almacenamiento conllevó a diversos tratamientos de mejora de suelos. Y para ello, se desarrollaron normas, como la norma API 650 (American Petroleum Institute), el cual rige a nivel nacional e internacional su uso, y que, a través del apéndice “B”, recomienda diversas técnicas de mejoramiento de terreno análogos a los métodos de estabilización mecánica o química, y con tipos de suelos de material blando propio o suelos granulares de material seleccionado de préstamo para la cimentación; sin embargo, estas prácticas de estabilización, sólo son recomendaciones generales, y no se tiene referencias de cuál o con qué método de estabilización asociado o no a un aditivo y tipo de suelos, se genera mayor efecto de significancia para su elección; y, por ende, existe una incertidumbre para escoger la técnica de estabilización de suelos de forma adecuada.

El uso y estudio de la técnica de estabilización de suelos para el “Mejoramiento de Terreno” en cimentaciones superficiales de tanques de almacenamiento es escasa o nula en la información de trabajos e investigaciones; en consecuencia, amerita explorar, describir, determinar y analizar los efectos de los factores determinantes de este tratamiento para conocer la mayor influencia de éstos en la mejora de suelos que estén relacionados directamente con los cambios que se producen en la resistencia al corte, y los parámetros de resistencia que deben ser medidos y cuantificados a través de ensayos de compresión triaxial para determinar la capacidad portante y verificar los asientos totales y diferenciales permisibles.

El “Mejoramiento de Terreno”, en el Perú, es exclusivamente enfocado y/o tratado con mayor profundidad por el sector de transportes, por medio de técnicas como la “Estabilización de Suelos”, y que tienen distintos usos en los componentes estructurales

de una carretera, ya sea pavimentada o no pavimentada, como en la capa de “Sub rasante”, “Sub base”, “Base” y en la capa de superficie de rodadura a nivel de “Afirmado”. Ante ello, bajo esta referencia y la recomendación de la norma API 650, la estabilización de suelos como alternativa de mejora de suelos en cimentaciones de tanques, enciende el interés de investigar de cuál de los métodos de estabilización asociados o no a un aditivo y tipos de suelos adecuados de las experiencias y recomendaciones resulta confiable para su aplicación.

Asimismo, se sabe que las variantes de los factores de estabilización de suelos más utilizados en carreteras, así como, en las recomendaciones de la norma API 650, están dadas por los métodos de estabilización (mecánica o química), y, los tipos de suelos (suelos de grano fino o suelos granulares gruesos); de los cuales, se sabe que éstos interactúan entre sí, y, por ello, se desea conocer que tan importante e influyente es el método de estabilización, ya sea el mecánico o el químico con un aditivo adecuado, y, el tipo de suelo, ya sea el suelo de grano fino o suelo granular grueso; o, la combinación directa o cruzada entre las categorías de ambos factores, para desarrollar un tratamiento superior de estabilización de suelos, que tenga efectos significativos en el incremento de la resistencia al corte de un mejoramiento de terreno en tanques de almacenamiento; por lo tanto, es oportuno su análisis y evaluación, y, a su vez, complementariamente describir colateralmente otras propiedades geotécnicas como la densidad, contenido de humedad, plasticidad, capacidad portante e índice CBR.

De otro lado, los estudios de mejora de suelos en carreteras a través de la estabilización de suelos, sólo están limitados a ensayos de calidad CBR, y, más no así, a ensayos de compresión triaxial, que determinen la resistencia al corte que se aproximen a la realidad del performance del comportamiento del suelo con las cargas de la estructura, debido a lo complejo del material, (finos, gravas y arena), costos elevados, limitado equipamiento de laboratorios, y manipulación de especímenes de regular tamaño.

1.2 Delimitación del Problema

1.2.1 Espacial (Geográfica)

Comprende los suelos del área focalizada de 12,783.22 m² y perímetro de 491.19 m, ubicado en la carretera a Ventanilla, Km 25, de la Pampilla del distrito de Ventanilla - Callao, provincia Constitucional del Callao, departamento de Lima - Perú.

1.2.2 Temporal

Comprende dos etapas:

1. Primera etapa: Se realizó la recopilación de antecedentes de solución al problema de investigación, casos, tipos, exploración, estudio de campo y laboratorio y planteamiento del diseño experimental definitivo (2017).
2. Segunda etapa: Se realizaron los ensayos de laboratorio del diseño experimental y cálculos a nivel geotécnico y mecánica de suelos (2018 y 2021).

1.2.3 Temática y unidad de análisis

- Los conceptos son: suelos, cimentaciones superficiales, estabilización de suelos, mejoramiento de terreno, tanques de almacenamiento.
- La unidad de análisis: suelos de grano fino tipo (CL) del terreno de fundación de la estructura proyectada y el suelo granular grueso tipo (GM) como material seleccionado de préstamo para el mejoramiento de terreno.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Problema General

¿Cuáles son los efectos que genera el uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima?

1.3.2 Problemas específicos

- a) ¿De qué manera influye el uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en los parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima bajo esfuerzos de compresión triaxial UU?
- b) ¿En qué porcentajes se incrementa la capacidad portante del suelo crítico con el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima a través del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos?
- c) ¿Hasta qué porcentajes de índice CBR se logra alcanzar con el uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima?

1.4 Justificación e Importancia

1.4.1 Justificación

En el territorio peruano, en las últimas décadas, se ha estado impulsando con mayor énfasis el mejoramiento de terreno de cimentaciones superficiales, con la finalidad de minimizar los daños estructurales debido a la interacción suelo - estructura;

y, para ello, la presente investigación constituye un aporte académico, para el conocimiento de la estabilización de suelos, como alternativa de mejoramiento de terreno para cimentaciones superficiales de tanques.

1.4.2 Valor teórico

La estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno podrá ser considerada y aplicada, en el tratamiento de suelos desfavorables en cimentaciones superficiales de tanques de almacenamiento para hidrocarburos y otros líquidos.

1.4.3 Relevancia social

Serán útiles como bibliografía de consulta en el tema de mejoramiento de suelos desfavorables, en cimentaciones superficiales de tanques de almacenamiento para hidrocarburos y otros líquidos; tanto para docentes como alumnos.

1.4.4 Implicaciones prácticas

Conocer los beneficios de la estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno de suelos desfavorables en cimentaciones superficiales.

1.4.5 Tecnología

La estabilización de suelos en cimentaciones superficiales, como parte de los métodos de mejora de suelos con el uso de procesos mecánicos, físicos y químicos, representa una alternativa moderna para el tratamiento de suelos desfavorables y que tiene poca difusión y aplicación en estructuras de tanques atmosféricos.

1.5 Limitaciones de la Investigación

Se enmarcaron a nivel de espacio, coste, tiempo, disponibilidad de equipos de laboratorio y recursos de insumos de materiales, como se señala a continuación:

1. La calidad del material de suelo granular grueso estará limitada a la disponibilidad de éste, y será seleccionado de las canteras más próximas al lugar de estudio de la región de Lima, y será evaluada en función de sus características más adecuadas y cercanas a las ideales para estructuras de base de infraestructura vial.
2. Se seleccionó y utilizó un solo aditivo estabilizante, previa evaluación de sus bondades y limitaciones, en función a la certificación para su uso, la disponibilidad del producto dentro de la región local, el coste, impacto ambiental, estudios anteriores y experiencias de trabajos realizados.
3. La determinación de los parámetros de resistencia al esfuerzo de corte, se calculó a partir de ensayos de compresión triaxial del tipo UU, aunque por la

particularidad de la estructura de tanque a construir, una determinación de los parámetros de resistencia a través de ensayos es tolerable y aceptable.

1.6 Objetivos.

1.6.1 Objetivo General.

Determinar y analizar los efectos del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima.

1.6.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar y analizar la influencia de los efectos del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en los parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima bajo esfuerzos de compresión triaxial UU.
- b) Determinar los porcentajes de incremento de la capacidad portante del suelo crítico con el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima a través del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos.
- c) Determinar los porcentajes de índice CBR que alcanza el uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Investigaciones Internacionales

- (López Martínez, 2017). En su estudio “Mejoramiento de las propiedades físico mecánicas de los suelos arenosos del sector de Pomasqui para cimentaciones superficiales y contrapisos, mediante el uso de cemento tipo MH”, logró mejorar las propiedades físico mecánicas de los suelos arenosos del sector de Pomasqui para cimentaciones superficiales y contrapisos, mediante el uso de cemento tipo MH. Utilizando métodos de ensayos de mecánica de suelos como clasificación, Proctor modificado, CBR, corte directo y corte triaxial UU en el Laboratorio de Suelos Geoconsult, y llegó a obtener los siguientes resultados y conclusiones:
 - El uso de cemento tipo MH con un 3% al peso seco es adecuado y conveniente desde el punto de vista técnico como económico para el mejoramiento de las propiedades físico mecánicas del suelo.
 - El uso de suelo cemento al 3% del peso seco representa un ahorro de aproximadamente un 40% en comparación al mejoramiento con material de sub base (lastre). La relación del 3% al peso seco de cemento puede ser llevada a campo como un saco de cemento 50 kg por cada m³ de suelo.
 - Los parámetros de diseño para el suelo arenoso de Pomasqui mejorado al 3% con cemento con respecto al suelo natural alcanzaron incrementos en: cohesión hasta 100%, ángulo de fricción hasta 80%, módulo de elasticidad hasta 600% e índice CBR hasta 130%.
 - Los parámetros de diseño para el suelo arenoso de Pomasqui mejorado al 3% con cemento con respecto al suelo natural compactado alcanzaron incrementos en: cohesión hasta 100%, ángulo de fricción hasta 0%, módulo de elasticidad hasta 366% e índice CBR hasta 420%.
- (Oyola Guzman & Vaca Oyola, 2018). En su investigación “Uso de la teoría de Mohr-Coulomb”, logró explicar el mejoramiento de suelos mediante el proceso de compactación, haciendo uso de la teoría de falla de Mohr-Coulomb. A su vez, resalta la importancia de controlar la presión de poro en ciertos intervalos del proceso, a fin de evitar la manifestación de problemas de inestabilidad mecánica.

En la que se analizan las tensiones que se generan en el suelo durante el proceso de compactación, también se analizan los problemas de inestabilidad mecánica que pudieran presentarse en suelos cohesivos debido al exceso de presión de poro. De cuál, se resaltan las siguientes conclusiones:

- En trabajos de compactación es importante controlar el contenido de agua óptimo, especialmente en el caso de suelos cohesivos, con el fin de evitar los desagradables problemas de inestabilidad mecánica.
 - Para que se presenten fenómenos de inestabilidad mecánica, el suelo se debe encontrar con un determinado grado de saturación muy próximo a 1, es decir con un contenido de agua mayor al contenido de agua óptimo determinado en los ensayos de compactación en laboratorio.
 - La presión de poro puede favorecer la compactación si no es demasiado alta. En trabajos de compactación en obra, si se mide la presión de poro y la resistencia, se puede determinar de forma más controlada la calidad del proceso de compactación.
 - Si la presión de poro en materiales impermeables es demasiado alta, da lugar a que se presenten fenómenos de inestabilidad mecánica.
- (Duzceer, 2003). En su artículo “Modificación del Terreno para Tanques de Almacenamiento de Petróleo Utilizando Columnas de Piedra”, describe el diseño, control de calidad y funcionamiento de columnas de piedra instaladas por medio de vibro-sustitución para la mitigación de la licuación y control del asentamiento bajo la cimentación de los tanques de acero para almacenamiento de petróleo en el Poti Oil Terminal, Georgia. En la primera fase del proyecto fueron construidos cuatro tanques de almacenamiento de petróleo con un diámetro variable entre 18,5 y 28,5 metros. El subsuelo consiste en arena gruesa limosa, suelta a media, de 20 metros de espesor, que suprayace un estrato de 15 metros de espesor de arcilla media a rígida. El nivel freático fue localizado a una profundidad de 1,5 metros. El diseño geotécnico recomendó la instalación de columnas de piedra de un metro de diámetro y 15 metros de longitud construidas por vibro-sustitución, las cuales mitigarían la licuación y reducirían el asentamiento. Esta instalación corresponde a un cociente de reemplazo del área del 12,5 % al 16,5 %. Ensayos de penetración estándar fueron realizados bajo cada tanque, antes y después de la modificación del suelo. Se presentan y discuten los resultados de ensayos preliminares y post-mejoramiento y

asentamientos observados durante ensayos hidrostáticos. Y se resaltan las siguientes conclusiones:

- La mejora del suelo de los tanques de aceite de acero de gran diámetro se realizó utilizando la técnica de reemplazo de vibraciones. Se instalaron un total de 988 columnas de piedra en la primera fase del proyecto de la terminal petrolera del puerto de Poti. La fase 1 del proyecto se completó antes del cronograma planificado.
- El diseño de las columnas de piedra debe verificarse con pruebas in situ realizadas antes y después de la mejora. La densidad relativa derivada de SPT, realizada después de la finalización de las columnas de piedra, varía en el rango de 70 - 75 %.
- Los asentamientos observados durante las pruebas hidrostáticas cayeron dentro de los límites tolerables. La observación de asentamientos a largo plazo durante la operación de los tanques ha demostrado que la mejora del suelo realizada sirve de manera eficiente.
- En general, la técnica de reemplazo de vibraciones demostró ser un medio efectivo y económico para mejorar las características de compresibilidad y el potencial de licuefacción de los suelos.

2.1.2 Investigaciones Nacionales

Dentro de los estudios nacionales no se reportaron estudios de estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno en tanques superficiales; sin embargo, se hace referencia a estudios de estabilización de suelos en vías terrestres.

- (Pusari Quispe & Rodríguez Machuca, 2020), en su investigación “Estudio experimental de mejoramiento de las propiedades de resistencia al corte de un suelo expansivo con polvo de vidrio reciclado y fibras de polipropileno en la ciudad de Talara, departamento de Piura”, logró estudiar la mejora de suelos con el uso de polvo de vidrio reciclado y la fibra de polipropileno sobre las arcillas expansivas presentadas en la Urbanización Sudamérica, localizada en Talara, Piura. Cuyo objetivo fue demostrar que el uso de polvo de vidrio reciclado y la fibra de polipropileno se complementan, logrando una gran mejora en el comportamiento de aumentar la resistencia al corte de un suelo expansivo, a comparación del uso de otros aditivos, como el cemento, cal y caucho reciclado, entre otros. Tiene una metodología de ser descriptiva y experimental a través de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, los cuales llegaron a las siguientes conclusiones más relevantes.

- Las propiedades de resistencia al corte mejoraron, usando las dosificaciones de 5%, 6% y 7.5%. Incluso, se obtuvo que la expansividad se redujera.
- La dosificación óptima fue la de 5% de sustitución, que fue la que logró mejorar los parámetros de cohesión, y el ángulo de fricción. En primer lugar, logró obtener una máxima densidad seca de 1.876 gr/cm³ y 11.5% como porcentaje de humedad óptima. En segundo lugar, la prueba de corte directo registró que la cohesión y ángulo de fricción para esta muestra (Alterada 1) eran de 0.4 kg/cm² y 34.3° respectivamente. Finalmente, a causa de que esta muestra presentara los mejores resultados en cuanto a parámetros de resistencia al corte, las máximas resistencias al corte pudieron también registrar los mejores resultados para los esfuerzos de confinamientos de 0.5, 1 y 2 kg/cm², los cuales son 0.741, 1.082 y 1.764 kg/cm² respectivamente.
- Quispe A. (2015). En su estudio “Incidencia de la adición de aditivo Perma-Zyme 22X en suelos con alto contenido de finos para la construcción de carreteras de tipo afirmado”, logró evaluar y mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos desfavorables (suelos tipo SC y GC) ante la humedad de las canteras de Pekosani y Chijuya para la construcción de las carreteras de tipo afirmado. Y para ello, planteó el mejoramiento de suelo, con el uso del aditivo Perma-Zyme 22X para la conformación de la capa de afirmado en la construcción de las carreteras de tipo afirmado de la región Puno, con el fin de construir una vía resistente y durable. Dichos ensayos, los realizó en el laboratorio de GEO. SEG. CONSULT. TEC. EIRL de la Ciudad de Puno, del que se desprende algunos resultados y conclusiones:
 - El uso de aditivos enzimáticos con dosis de 1.1 L / 30 m³ de material de suelo tipo SC de la cantera Perkosani y material de suelo GC de la cantera Chijuya reportaron incrementos de CBR (95% MDS) 1” hasta 30.11% y 40.99% respectivamente con respecto al material sin aditivo.
 - El uso de aditivos enzimáticos con dosis de 1.1 L / 30 m³ de material de suelo tipo SC de la cantera Perkosani y material de suelo GC de la cantera Chijuya reportaron incrementos de CBR (100% MDS) 1” hasta 29.70% y 38.89% respectivamente con respecto al material sin aditivo.
 - El uso de aditivos enzimáticos con dosis de 1.1 L / 30 m³ de material de suelo tipo SC de la cantera Perkosani y material de suelo GC de la cantera Chijuya reportaron incrementos de CBR (95% MDS) 2” hasta 29.23% y 38.00% respectivamente con respecto al material sin aditivo.

- El uso de aditivos enzimáticos con dosis de 1.1 L / 30 m³ de material de suelo tipo SC de la cantera Perkosani y material de suelo GC de la cantera Chijuya reportaron incrementos de CBR (100% MDS) 2" hasta 28.18% y 46.89% respectivamente con respecto al material sin aditivo.
- (Ccora Montes & Montenegro Santacruz, 2011). En su investigación "Estudio comparativo del mejoramiento de la base aplicando estabilizadores: emulsión asfáltica, cal y cemento - carretera Cañete - Chupaca: tramo km 152+000 - 158+000", realizó estudios comparativos de los trabajos de estabilización de la base del afirmado con material de cantera de suelos del tipo GC (SUCS) con cada uno de los estabilizadores, emulsión, cal y cemento Portland en los laboratorios de mecánica de suelos de la Universidad de ingeniería (UNI); y, de otro lado, en el laboratorio de BITUPER, se realizó el ensayo Marshall a la mezcla del material de cantera con emulsión asfáltica y el ensayo de Tracción Indirecta a la mezcla material de cantera - emulsión y material de cantera-cemento Portland. Llegando a las conclusiones siguientes:
 - Las muestras de suelo (GC); suelo (GC) + emulsión asfáltica (4.3%); suelo (GC) + cal (5%) y suelo (GC) + cemento Portland (8%) reportan índices CBR al (95%) 1" hasta valores de 25.50%, 37.50%, 100.00% y 172.00% respectivamente.
 - Las muestras de suelo (GC); suelo (GC) + emulsión asfáltica (4.3%); suelo (GC) + cal (5%) y suelo (GC) + cemento Portland (8%) reportan índices CBR al (100%) 1" hasta valores de 67.50%, 58.00%, 148.00% y 193.00% respectivamente.
 - Las muestras de suelo (GC); suelo (GC) + emulsión asfáltica (4.3%); suelo (GC) + cal (5%) y suelo (GC) + cemento Portland (8%) reportan valores promedio de resistencia a la compresión hasta 3.70 Kg/cm², 4.73 Kg/cm², 7.62 Kg/cm² y 22 Kg/cm², respectivamente.
 - El cemento Portland ofrece mejores bondades que los estabilizadores como la cal y la emulsión asfáltica sobre suelos del tipo GC (SUCS), referidos a los indicadores de CBR y resistencia a la compresión simple.
- (Ravines Merino, 2010), en su investigación "Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carretera", logró evaluar el Perma-Zyme 22X (aditivo a base de enzimas orgánicas) como estabilizador de suelos para incrementar la resistencia de suelos finos plástico-arcillosos. Los ensayos de las pruebas se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad de Piura. El estudio se centra en un solo tipo de suelo (CL), y las variaciones sufridas en sus propiedades mecánicas después del uso del aditivo

químico, para concentraciones de 0.9, 1.0, 1.1 y 1.5 L de aditivo en 30 m³ de material de suelo. Del que se desprenden algunas conclusiones y apreciaciones, como:

- El aditivo Perma-Zyme 22X mejora el suelo mezclado (CL) producto del 75% de un material de afirmado (AASHTO: A-1-a) + 25% de suelo arcilloso (AASHTO: A-6) en su índice CBR (100%) 1" y CBR (100%) 2" hasta un 233.33% y 200.00% respectivamente de incremento con respecto al suelo CL.
- La dosis de aditivo de 1.5 L/30 m³ de suelo bajo condición de 72 horas de secado antes de colocarlas en la poza de curado dio mejores resultados.
- (Ugaz Palomino, 2006), en su investigación "Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de sub rasante", logró estudiar el comportamiento de los distintos suelos estabilizados con aditivos químicos como RBI - Grado 81, Cal Viva, Enzimas Orgánicas (ENDURAZYME), Cloruro de Calcio (QUIM KD - 40) y Aceites Sulfanados (CON - AID) para su aplicación en carreteras con EMS de laboratorio y campo; asimismo, estudió el comportamiento químico de los suelos con los aditivos con el uso del ensayo de Azul de Metileno. Del cual se resaltan las siguientes conclusiones:
 - Del análisis de diversos productos, tres de ellos, como las sales - Cloruro de Calcio KIM KD 40; Aceites Sulfanados - CON AID y aditivo inorgánico - RBI - Grado 81 nos brindaron buenos resultados.
 - El aditivo RBI-Grado 81, es compatible con una amplia gama de suelos para estabilizar con respecto a las demás, que van desde arenas hasta arcillas, pasando por limos y gravas o la mezcla de ellos, con buenos resultados en las características de resistencia de incremento en el valor de CBR.
 - El estabilizador RBI-Grado 81, logra el mayor incremento del valor de CBR en 161%, mientras que el Quim KD 40 logra 37% y el CON AID un 117%.
 - Se lograron valores de 600% de CBR en una grava GW-GM con el estabilizador RBI-Grado 81, mostrándonos que el aditivo puede ser muy útil en vías afirmadas conformadas por materiales granulares a los que se le quiere dar mayor durabilidad y menos trabajos de mantenimiento. En el resto de casos se logró incrementos de diez veces el valor inicial.
 - El costo más bajo por suelo estabilizado por metro cúbico corresponde al QUIM KD 40, con 19 nuevos soles y el mayor corresponde al Aditivo RBI-Grado 81, con 71 nuevos soles por metro cúbico de suelo estabilizado.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Teoría de Resistencia al Cortante

“La resistencia al corte en suelos es el esfuerzo de corte máximo que el material puede soportar justo antes de fallar. La falla o ruptura puede ser catastrófica si se produce en forma frágil, o bien se puede producir en forma dúctil por acumulación de grandes deformaciones plásticas. En general, las fallas en suelos están asociadas a la acumulación de grandes deformaciones plásticas sin una pérdida completa de la resistencia” (Saéz, 2010, pág. 94).

(Bowles J. E., 1982), afirma que “la capacidad de carga última de un suelo bajo una carga de cimentación depende principalmente de la resistencia al corte” (p. 456).

La medición de la resistencia al corte, se puede realizar en laboratorio, a través de ensayo de corte directo, triaxial, compresión no confinada y consolidación isotrópica; y, referencialmente en campo, a través de los ensayos de penetración SPT, ensayos de penetración con cono holandés CPT, carga directa, corte directo in situ y aparato de veleta; y entre otros.

2.2.2 Teoría de la Capacidad de Carga

2.2.2.1 Capacidad de carga:

Es lo que puede resistir un determinado tipo de suelo ante una cantidad y tipo de carga en condiciones específicas de cimentación, sin sufrir desplazamientos, deformaciones y/o fallas, previa aplicación de un factor de seguridad. La resistencia de un suelo está determinada por varios parámetros geotécnicos como la cohesión, el peso volumétrico y la fuerza de fricción existente entre partículas. La capacidad de carga en un suelo no es única y fija; pues, no solo depende de las características físico mecánico y tipo de suelo; sino también del tipo de estructura, cimentación y tipo de carga.

Capacidad de carga crítica:

Es la carga máxima que es posible aplicar a éste, sin exceder en ningún punto bajo el cimiento la resistencia del suelo de fundación.

Capacidad de carga última:

La carga por área unitaria de la cimentación en la que ocurre la falla por corte en un suelo se denomina capacidad de carga última (Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 2012, pág. 133).

Uno de los primeros esfuerzos por adaptar la mecánica de suelos son los resultados de la Mecánica del Medio Continuo en la teoría de Terzaghi, y a partir de ésta se generaron otras teorías como Prandtl, Hill, Skempton, Meyerhof y Zaevaert.

2.2.2.2 Tipos de Falla por Capacidad de Carga:

Las fallas por capacidad se producen cuando el terreno tiene una capacidad de carga inferior a las cargas impuestas.

Falla general por corte

Sucede cuando la superficie de deslizamiento es continua desde un borde de la cimentación hasta la superficie del terreno en el lado opuesto (ver figura(a)). Es propia de las arenas compactas y se caracteriza por ser súbita y catastrófica.

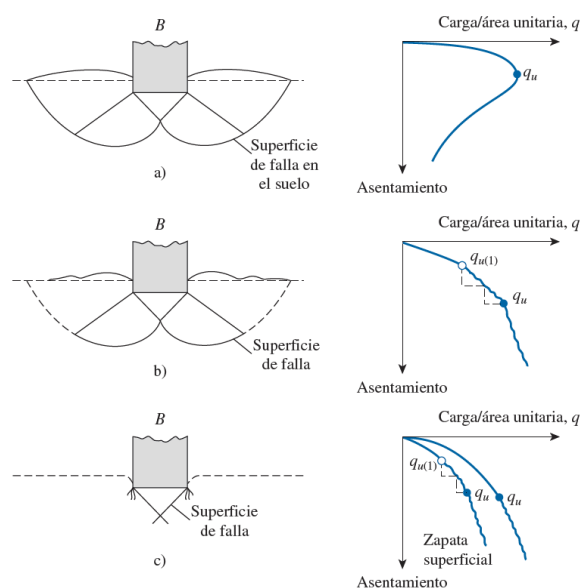
Falla local por corte

Sucede con el hinchamiento y asentamiento del suelo. Y se caracteriza por formar una cuña debajo de la cimentación similar a la falla general por corte, pero las superficies de falla no son completas, tal cual se muestra en la figura (b).

Falla por corte por punzonamiento

Sucede con el movimiento vertical de la cimentación, mediante la compresión del suelo debajo de ella. Y se caracteriza por aflorar la rotura del suelo por corte alrededor de la cimentación, como se ilustra en la figura (c), en la que no se observan movimientos antes de la rotura.

Figura 1: Tipos de falla en cimentación superficial



Fuente: (Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 2012, pág. 134)

$$q_c = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \dots \dots \dots \text{Ecuación N°05}$$

Donde:

$C' =$ cohesión aparente del suelo

$\gamma =$ Peso específico del suelo

$q = \gamma D_f$ (esfuerzo efectivo al nivel del fondo de la cimentación)

$D_f =$ profundidad de desplante de la cimentación

$B =$ ancho de la cimentación (= diámetro para cimentación circular)

$F_{cs} F_{qs} F_{\gamma s} =$ Factores de forma

$F_{cd} F_{qd} F_{\gamma d} =$ Factores de profundidad

$F_{ci} F_{qi} F_{\gamma i} =$ Factores de inclinación de carga

$N_c, N_q, N_\gamma =$ factores de carga en función del ángulo de fricción Φ

Factores de capacidad de carga

Para la ecuación generalizada de capacidad de carga de Meyerhof, se asume que $\alpha = 45 + \frac{\phi'}{2}$, y no así a ϕ' ; y, a partir de ello, Prandtl; Reissner (1924); y Caquot y Kerisel (1953) y Vesic (1973) proporcionaron una modificación en la relación de N_c, N_q y N_γ respectivamente en función del ángulo de fricción del suelo (ϕ), tal cual se ilustra la variación de éstos por las siguientes expresiones:

$$N_q = \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) e^{\pi \tan \phi'} \dots \dots \dots \text{Ecuación N°06}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \dots \dots \dots \text{Ecuación N°07}$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi' \dots \dots \dots \text{Ecuación N°08}$$

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Suelo

2.3.1.1 Definición.

Se puede definir como el medio sobre el cual ocupan seres inertes y seres vivos en la periferia de toda la corteza terrestre y que son producto de la descomposición de las rocas por procesos físico-químicos y mecánicos a lo largo del tiempo, debido a

factores determinantes (geomorfología, litología, biológica, climática y factor tiempo), y sobre ella yacen las estructuras viales, urbanas, ferroviarias, portuarias, hidráulicas, sanitarias, estructuras no convencionales, etc.

2.3.1.2 Origen y formación de suelos:

Existe gran variedad de procesos que originan un determinado suelo en particular; y, entre éstos, podemos mencionar al eólico, sedimentación, meteorización y desintegración de material orgánico, etc.

2.3.1.3 El suelo como material de construcción:

Es el más abundante y utilizado desde tiempos remotos del proceso de civilización del hombre y su uso depende de sus características físico-mecánicas y de la convención para tal fin. Y entre ellos tenemos a las viviendas, monumentos, represas de tierra, rellenos, construcción de estructuras, etc. (Lambe, 2004, pág. 19)

2.3.1.4 Clasificación de suelos:

“Los sistemas de clasificación de suelos dividen los suelos en grupos y subgrupos con base en propiedades ingenieriles comunes como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico. Los dos sistemas de clasificación principales de uso actual son: 1) el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Unified Soil Classification System (SUCS)” (Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 2012, pág. 17).

2.3.1.5 Exploración de suelos:

(Das & Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 2019, pág. 2), sostiene que “todos los diseños geotécnicos requieren el conocimiento de las propiedades del suelo y la roca en las inmediaciones de la estructura. Estos se determinan a través de una exploración del suelo (también conocida como investigación del sitio) que consiste en (a) pruebas in situ, (b) muestreo en el sitio, y (c) pruebas de laboratorio en las muestras tomadas del sitio”.

2.3.1 Cimentación

2.3.1.1 Definición

Es la subestructura de cualquier obra civil, que se encuentra en contacto con el suelo de fundación, y que se encarga de recibir las cargas totales de las superestructuras y que tiene como la función principal de transferirlos de manera adecuada al terreno natural o sistema de suelo mejorado; es decir, es un elemento de soporte que distribuye todas las cargas de la estructura al terreno sin rebasar el límite de resistencia de esfuerzo permisible y movimiento permisible, con el fin de otorgarle

seguridad e integridad a los demás elementos estructurales; sin embargo, si sucede lo contrario, se presentan los daños en la estructura como se aprecia representado en las figuras adjuntas del diagrama de una cimentación superficial y sus respectivos fenómenos que se presentan en ésta.

Figura 3: Cimentación superficial

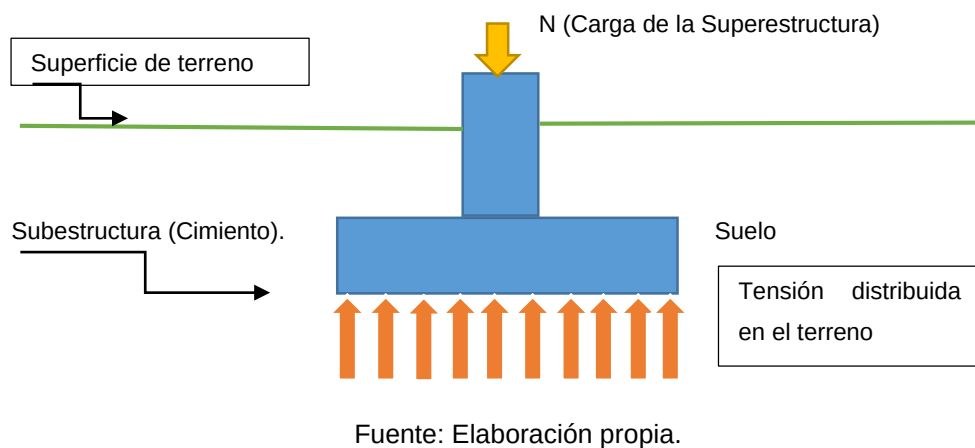
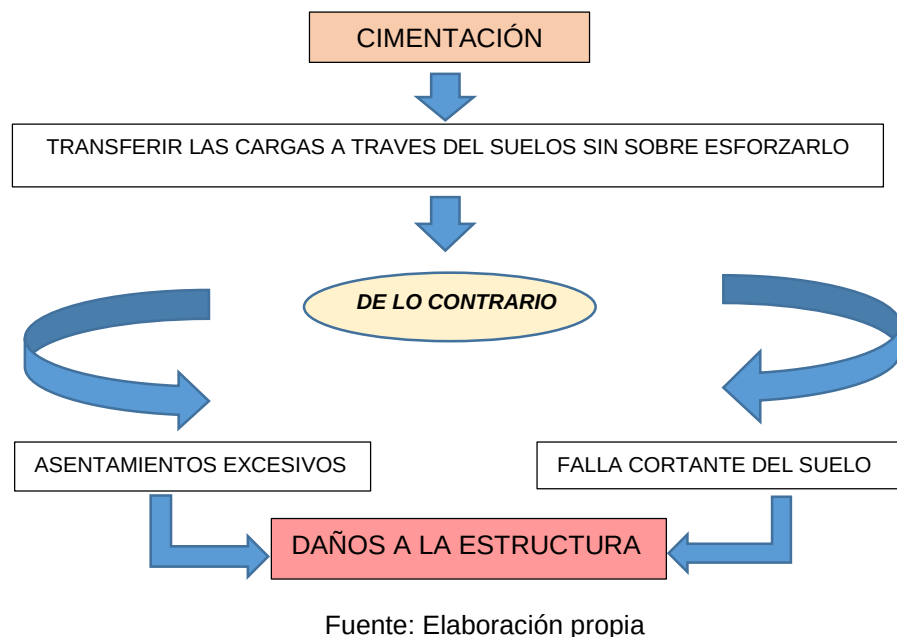


Figura 4: Diagrama de Fenómenos en una Cimentación



2.3.1.2 Criterios de diseño de cimentaciones

(Das & Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 2019, pág. 207) sostiene que un diseño seguro debe cumplir con los siguientes criterios:

1. Capacidad de carga: No debe haber fallas dentro del área de influencia del suelo circundante; pues la falla generaría riesgo de peligro en la estabilidad de la cimentación.

2. Asentamiento: El desplazamiento vertical en el suelo de fundación debe estar dentro de los rangos de límites tolerables.

De otro lado, (Bowles J. E., 1997, pág. 213), sostiene que es imprescindible determinar los asentamientos como la resistencia al corte del cimiento en cualquier estructura, y a veces en algunos casos los criterios de asentamientos controlan la capacidad de carga permitida u en muchos casos cuando la falla por resistencia cortante es simultánea a una rotación de un cimiento y determina la carga recomendada.

2.3.1.3 Tipos de cimentaciones:

Las cimentaciones pueden ser superficiales y profundas:

- a. **Cimentaciones superficiales:** Se caracterizan por la relación de $D_f/B \leq 5$ según la norma E-050, donde B es el ancho de la cimentación y D_f es la profundidad desde la superficie del terreno hasta la base de la subestructura; y tienen la función y particularidad de transmitir todas las cargas recibidas de la superestructura a través de cara inferior o base en contacto con el suelo. Éstas vienen a ser las zapatas aisladas, zapatas conectadas, cimentaciones corridas, losas de cimentación y parrillas de cimentación.
- b. **Cimentaciones profundas:** Son aquellas que se caracterizan por la relación $D_f/B > 5$ según la norma E-050, siendo D_f la profundidad de la cimentación y B el ancho o diámetro de la misma; el cual se encarga de transmitir las cargas a través de un estrato de gran espesor o a un estrato profundo que resiste en su totalidad; es decir, la transferencia de los esfuerzos es por medio de la fricción vertical entre la cimentación y el terreno. De las que se pueden tener los llamados pilotes de fricción y de punta, micropilotes, muros pantalla y cajones de cimentación.

La cimentación profunda es requerida convencionalmente, sólo si las cimentaciones superficiales no tengan la capacidad de carga que no permita obtener factores de seguridad apropiados.

2.3.1.4 Tipos de cimentaciones en tanques

Según la norma API 650, contempla tres cimentaciones típicas para este tipo de estructuras, y son:

- a. **Cimentaciones de tierra sin anillo**

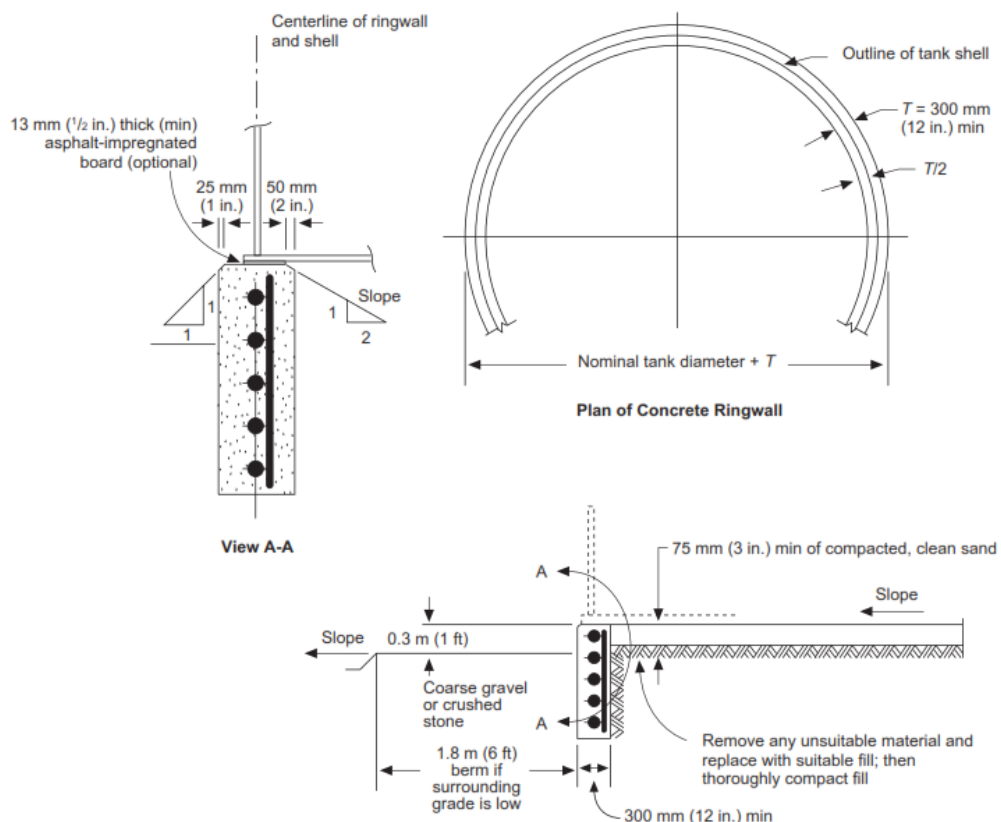
(American Petroleum Institute, 2012), sostiene que es factible cuando las condiciones del terreno natural son adecuadas favorablemente y responde

satisfactoriamente a las solicitaciones de las cargas del tanque y los asentamientos son mínimos; y, bajo esta condición, el cimiento puede ser de tierra, y a su vez, en éste, se tiene que verificar y lograr condiciones como: tolerancias máximas permitidas de diseño, plano estable de apoyo, límite de asentamiento general del gradiente del diseño de la tubería de conexión, no asentarse excesivamente en el perímetro de la estructura y entre otros.

b. Cimentaciones de tierra con anillo de hormigón

(American Petroleum Institute, 2012), sostiene que es recomendable cuando las cimentaciones reciben una carga importante en la carcasa de la estructura, y que se transmiten directamente sobre el cimiento, y es necesario utilizar el muro circular de concreto armado, y como alternativa, también, se puede utilizar un muro de piedra triturada. Los cimientos de tierra con anillo de cimentación tienen ventajas como desventajas y se describen e ilustran en la figura adjunta a continuación:

Figura 5: : Ejemplo de detalle de muro de anillo de concreto como cimentación



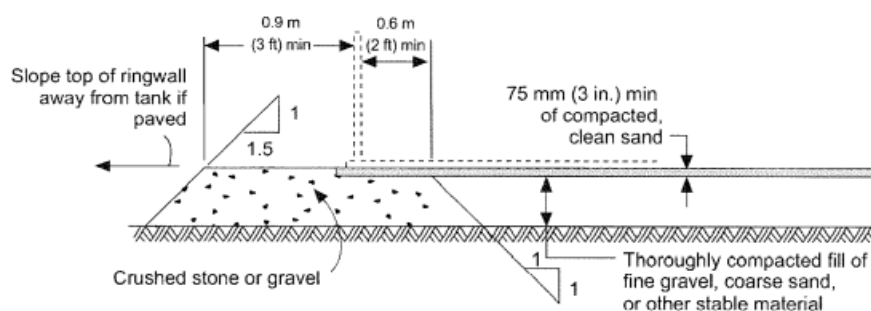
Fuente: (American Petroleum Institute, 2012, pp. B-3)

- i. La performance de la distribución de carga concentrada de la carcasa se reparte adecuadamente hacia el suelo con una uniformidad relativamente alta por debajo de la estructura del tanque.
- ii. El muro de anillo de concreto ofrece mejores condiciones de nivelado y rígido para la construcción del caparazón.
- iii. El muro de anillo de concreto es un referente constante y rígido en la nivelación durante la construcción de la carcasa.
- iv. La estructura lateral del muro de anillo de concreto sirve de retención del material de relleno debajo del fondo del tanque, y previene el desprendimiento de la misma producto de la erosión.
- v. Reduce el contenido de humedad del tanque.
- vi. Y como desventaja, se tiene que no se acondiciona rápidamente este tipo de estructuras, a los desplazamientos diferenciales, y que, debido a ello, pueden originarse incrementos considerables en los esfuerzos de flexión en las placas inferiores adyacentes a la pared del anillo de concreto.

c. Cimentaciones de tierra con un anillo de piedras trituradas y grava

(American Petroleum Institute, 2012), sostiene que es una alternativa de cimentación y es aquella que tiene por anillo de cimentación a piedras trituradas y gravas, y que cumplen las mismas funciones de un anillo de muro de concreto armado; del cual, se describe las ventajas y desventajas e ilustra ejemplarmente un cimientito típico:

Figura 6: Ejemplo de cimentación de tierra con muro de anillo con piedra triturada y grava



Fuente: (American Petroleum Institute, 2012, pp. B-4)

- i. Este tipo de cimentación otorga una buena distribución de la carga concentrada con el fin de generar las cargas en el suelo mucho más uniformes bajo el tanque.
- ii. La estructura del cimientito sirve de espacio para nivelar el tanque, y, a su vez, mantiene constante su contorno durante la construcción.

- iii. Genera estabilidad del relleno debajo del fondo del tanque, y, a su vez, protege de los riesgos de erosión y pérdida de material.
- iv. Puede acondicionarse sin dificultades a distintos asentamientos por sus características intrínsecas de flexibilidad.
- v. Una desventaja de la pared circular de piedra triturada o grava es que es más difícil construirla con tolerancias estrechas y lograr un plano nivelado para la construcción de la carcasa del tanque.

d. Cimientos de losa

(American Petroleum Institute, 2012), sostiene que este tipo de cimientos se proyecta con el propósito único de que las cargas del suelo presenten una distribución en una superficie mayor al área del tanque, y para este fin, se utilizará una losa de concreto armado, que, en algunas condiciones, puede demandar el uso de pilotes debajo de la losa para mejorar el soporte adecuado del tanque.

2.3.2 Mejoramiento de Terreno

2.3.2.1 Definición

Es el resultado del incremento de la resistencia o de rigidez del suelo del terreno con métodos y técnicas de mejora de suelos, con el único propósito de poder soportar diferentes solicitaciones de cargas de diferentes tipos de estructuras (Documento Básico SE-C Seguridad Estructural: Cimientos, 2019, pág. 98).

(Das & Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 2019, pág. 141), sostiene que es la modificación de las condiciones desfavorables naturales del terreno producto de problemas comunes de baja resistencia al corte, baja rigidez, alta permeabilidad y alto potencial de dilatación y contracción, en condiciones adecuadas para soportar las estructuras diseñadas. Dichas modificaciones están dadas por técnicas limitadas para problemas específicos.

2.3.2.2 Criterios de mejora de terreno

(Documento Básico SE-C Seguridad Estructural: Cimientos, 2019, pág. 99), considera algunos criterios y factores según corresponda, como:

- a) Espesor y propiedades del suelo o relleno a mejorar;
- b) Presiones intersticiales en los diferentes estratos;
- c) Naturaleza, tamaño y posición de la estructura a apoyar en el terreno;
- d) Prevención de daños a las obras o servicios adyacentes;
- e) Mejora provisional o permanente del terreno;

- f) En términos de las deformaciones previsibles, la relación entre el método de mejora del terreno y la secuencia constructiva;
- g) Los efectos en el entorno, incluso la posible contaminación por sustancias tóxicas (en el caso en que éstas se introdujeran en el terreno en el proceso de mejora) o las modificaciones en el nivel freático;
- h) La degradación de los materiales a largo plazo (por ejemplo, en el caso de inyecciones de materiales inestables).

2.3.2.3 Técnicas de mejoramiento de terreno

Existen gran variedad que depende de varios factores, y entre ellos, (Das & Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 2019), señala algunos principios generales de mejoramiento de terreno como: compactación, vibroflotación, voladuras (Blasting), pre-compresión, desagües de arena, drenajes verticales prefabricados, estabilización de suelos, columnas de piedra, pilotes de compactación de arena, compactación dinámica, lechada a chorro, y mezcla profunda.

2.3.3 Estabilización de Suelos

2.3.3.1 Definición

Consiste en dotar a los mismos de la resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo hasta la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización, es seguido de un proceso de compactación, como se aprecia en la vista fotográfica (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014, pág. 92).

Figura 7: Mejoramiento de terreno a través de las estabilización mecánica en la Obra: " Mejoramiento de la capacidad resolutive del hospital regional Miguel Ángel Mariscal Llerena"



2.3.3.2 Métodos de estabilización:

Existen diversos métodos que dependen del tipo de tratamiento y/o procedimiento utilizado para tal fin, puesto que existen métodos que utilizan

procedimientos mecánicos, físicos, químicos, térmicos, eléctricos y procedimientos combinados. El uso de cada uno de ellos dependerá de distintos factores y sus características, limitaciones y bondades apropiadas para cada fin de las condiciones particulares del terreno a mejorar.

2.3.3.3 Tipos de estabilización de suelos

La tipificación de esta técnica de mejora de suelos dependerá de acuerdo a los criterios que se les pueda asignar para su agrupación e identificación.

(Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015, pág. 266), agrupa en dos categorías: estabilización química y estabilización mecánica.

Según Winterkorn (2005), citado en (Choque Sánchez, 2012, pág. 38), propone la clasificación siguiente:

- “Estabilización mecánica implica el tratamiento y la compactación de los suelos para su densificación”.
- “Estabilización física comprende buscar una buena granulometría usando materiales granulares o cohesivos”.
- “Estabilización química encierra los cambios que se le dan a las propiedades del suelo mediante el uso de agentes cementantes, ligantes asfálticos o humectantes para lograr una adecuada estabilidad”.

2.3.4 Estabilización Mecánica

2.3.4.1 Definición

Es una técnica de mejora de terreno, que tiene como fin la densificación y, por ende, mejorar los parámetros de resistencia, y viene a ser uno de los tratamientos de mayor uso desde tiempos muy remotos, como la compactación, para el mejoramiento de terreno; ya sea de los propios suelos naturales, como de suelos seleccionados de préstamo, para los diferentes propósitos ingenieriles.

(Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015), dice que la estabilización mecánica comprende metodologías que tienen el propósito de incrementar propiedades geotécnicas sin el uso de agentes de cohesión química.

2.3.5 Estabilización Química

2.3.5.1 Definición

(Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015, pág. 266), señala que es una técnica que involucra el uso de aditivos químicos en el suelo para mejorar su desempeño, como en mejorar la manejabilidad, reducir la plasticidad y el potencial de

expansión - contracción; y también para flocular las arcillas si son dispersivas o para dispersar levemente las partículas si dificultan su compactación.

2.3.5.2 Tipos de aditivos

Según su origen (Choque Sánchez, 2012), agrupa de la siguiente manera:

Tabla 1: Clasificación de aditivos estabilizadores (según su origen)

Absorventes de agua	Cloruro de calcio, cloruro de sodio y cloruro de magnesio
Derivados del petróleo	Emulsiones asfálticas, líquidos asfálticos y emulsiones de asfalto modificado.
No derivados del petróleo	Grasa de animales, lignosulfatos, melaza-azúcar de betarraga, emulsiones de aceite de tallos, y aceites vegetales.
Electroquímicos	Enzimas, productos iónicos, y aceites sulfonados.
Polímeros sintéticos	Acetato polivinílico y vinil acrílico.
Aditivos de arcilla	Bentonita y montmorillonita.

Según el tipo de material Thenoux (2009), citado en (Choque Sánchez, 2012, pág. 48), clasifica de la siguiente manera:

Tabla 2: Clasificación de aditivos químicos (según el tipo de material)

Tipo de materiales	
Ligantes asfálticos	- Emulsiones asfálticas - Asfalto espumado
Cementantes	- Cemento - Cal - Cenizas
Compuesto químicos no tradicionales	- Aditivos (orgánicos y sintéticos) - Sales (Cloruro de calcio, sodio y magnesio)

2.4 Marco Normativo

2.4.1 Norma Técnica E. 050: Suelos y Cimentaciones

(Reglamento Nacional de Edificaciones: Norma E. 050, 2019, pág. 4), afirma que son las bases de los requisitos para la práctica de Estudios de Mecánica de Suelos (EMS), y éstos deberán ejecutarse bajo los propósitos de seguridad, sostenibilidad, durabilidad, funcionabilidad y uso racional de los recursos; y, por ello, se rigieron a ésta todas las prácticas de pruebas de EMS en la presente investigación.

2.4.2 Norma API 650

Es un documento creado por el Instituto Americano del Petróleo, el cual está conformado por las experiencias técnicas acumuladas en la fabricación y construcción

de tanques de acero soldados para el almacenamiento de hidrocarburos; y, que en el apéndice B, presenta recomendaciones para el diseño y construcción de cimientos de los tanques atmosféricos en la superficie.

2.4.3 Norma API 625

Es otra de las normas API, que otorga requisitos generales de funcionamiento, garantía de calidad y servicio y rendimiento para sistemas de tanques atmosféricos de baja presión de capacidad de 800 m³ a mayores.

2.4.4 Norma API 653

Es otra de las normas del Instituto Americano del Petróleo, que se encarga de dar pautas de requisito en inspección, reparación, modificación y reconstrucción de tanques de acero soldado.

2.4.5 Manuales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC)

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones, como ente rector de la gestión de infraestructura vial, presenta manuales que tienen carácter normativo en áreas competentes a cada componente, como: Manual de Carreteras: Sección suelos y pavimentos (MTC); Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013) (MTC); y Manual de Ensayo de Materiales (MTC). Éstos fueron utilizados por los conceptos y bases teóricas sobre estabilización de suelos y algunos conceptos de ensayos de mecánica de suelos correlacionales a la misma.

Capítulo III

MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Enfoque de la Investigación

La presente investigación se desarrolló dentro de un enfoque cuantitativo del tipo experimental, de forma sistematizada y secuencial.

3.2 Alcances de la Investigación

Es explicativa, porque sustenta la causa-efecto de los métodos de estabilización y tipos de suelos en el mejoramiento del terreno.

(Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018), afirma “que un experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes y por qué lo hacen, por ello su alcance es explicativo” (p. 153).

3.3 Diseño de la Investigación

Se caracterizó por generar una manipulación de sus modalidades de la variable independiente (métodos de estabilización y tipos de suelos), para causar un efecto sobre la variable dependiente (mejoramiento de terreno); Por lo tanto, es del tipo experimental (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 129).

De otro lado, también se caracterizó por ser del tipo experimental puro, por reunir los dos requisitos para el control y validez interna, y son: presencia de grupos de comparación (manipulación de la variable independiente) y equivalencia de los grupos (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, pág. 163); de los cuales, para su cumplimiento, se tiene que ambos grupos fueron tratados bajo las mismas condiciones técnicas en su integridad, y lo representamos de la siguiente manera:

- Grupo de control (GC) : Terreno sin tratamiento de métodos de estabilización y tipos de suelo.
- Grupo experimental (GE) : Terreno con tratamiento de métodos de estabilización y tipos de suelos.

(Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018) sostiene tres requisitos fundamentales de una investigación del tipo experimental, y lo representamos el cumplimiento en la tabla adjunta.

Tabla 3: Requisitos de cumplimiento de un diseño experimental

Ítem	Requisito	Descripción de requisito practicado	Condición
01	Manipulación de una o más variables independientes	El modo de estabilización y tipo de suelos fueron manipulados intencionalmente en sus respectivas variantes categóricas para causar efecto en el mejoramiento del terreno.	Si cumple
02	Medición del efecto de la variable dependiente (adecuada, válida y confiable)	Se utilizaron protocolos de métodos científicos supervisados por técnicos especialistas y jefe de laboratorio de mecánica de suelos para medir el efecto de la variable dependiente.	Si cumple
03	Control sobre la situación experimental (validez interna).	“Los experimentos de laboratorio se realizan en condiciones controladas, en las cuales el efecto de las fuentes de invalidación interna es eliminado” (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 150).	Si cumple

3.3.1 Descripción experimental

(Kuehl, 2001), afirma que un experimento está sujeto a las limitaciones de las investigaciones que plantean un conjunto particular de circunstancias, bajo ciertos parámetros específicos de control para observar y evaluar las consecuencias de las observaciones resultantes.

En nuestro estudio, es conocido que la mejora del terreno está relacionada con los factores de métodos de estabilización y tipos de suelo utilizados; y surge la interrogante de cómo influyen cada uno, ya sea independientemente o si interactúan entre sí, al variar sus categorías, tanto la mecánica y química como los tipos de suelo de grano fino y suelo granular grueso de cada factor respectivamente. Con ello, se intentó encontrar el mejor resultado para el mejoramiento de terreno utilizando tratamientos variados de métodos de estabilización y tipo de suelos, y, a su vez, se tuvo en consideración dos grupos de investigación (grupo de control y grupo experimental) para la comprobación de los efectos de las variables independientes y dar respuesta a la hipótesis planteada.

3.3.2 Diseño del tratamiento

(Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) afirma que “los diseños factoriales manipulan dos o más variables independientes e incluyen dos o más niveles o modalidades de presencia de cada una de las variables independientes. Se utilizan muy a menudo en la investigación experimental”.

Sobre la base de experiencias favorables de la estabilización de suelos en el sector transportes y las recomendaciones de la norma API 650, se acotó y eligió dos variables (factores) con sus respectivas categorías (niveles) para su evaluación, y está dado por métodos de estabilización (mecánica y química) y tipos de suelos (suelo de grano fino y suelo granular grueso); por lo tanto, por el número de factores y sus respectivas variantes de categorías, se planteó evaluar un arreglo de diseño factorial de 2×2 (2^k) con cuatro tratamientos resultantes de todas las posibles combinaciones de cada factor con sus respectivos niveles.

3.4 Universo, Población y Muestra.

3.4.1 Universo

En la investigación la constituye el suelo de la superficie terrestre.

3.4.2 Población

Es lo que engloba a las unidades de estudio, y que éstas presentan atributos de interés en un estudio de investigación y pueden ser individuos, objetos, acontecimientos o fenómenos (Ñaupas Paitán, Valdivia Dueñas, Palacios Vilela, & Romero Delgado, 2018, pág. 334).

De lo anterior, la población está constituida por el suelo de fundación localizada debajo de la estructura proyectada en un área aproximado de 12,783.22 m² ubicado frente a la carretera a Ventanilla Km. 25, en el Distrito de Ventanilla - Callao; y el suelo de material seleccionado de la cantera Gloria ubicado en el distrito de Ate, Provincia de Lima y Departamento de Lima, Km 14+800 margen derecho de la Carretera Central.

3.4.3 Muestra

Forma parte de un todo como un subconjunto de elementos que corresponden a ese conjunto, que determinamos sus características y se le denomina población (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 175).

El muestreo se realizó bajo el modo no probabilístico, pues es orientada y/o dirigida a través de normativas y tratados de la Mecánica de Suelos; y, por ello, se eligió muestras de calicatas elegidas convencionalmente bajo los siguientes criterios:

- a. Selección del suelo representativo más crítico del terreno de fundación de la estructura proyectada.
- b. Ubicación de las calicatas con referencia a la cimentación de la estructura proyectada.

- c. El nivel de profundidad de exploración de las muestras de las calicatas para el estudio fue de 1.50 a 2.50 m, etc.

Tabla 4: Cantidad y tipo de estudios de mecánica de suelos (EMS)

ítem	Tipo de Ensayo	Cantidad de ensayos
01	Análisis granulométrico	04
02	Contenido de humedad	04
03	Peso específico	04
04	Límite de consistencia	02
05	Proctor modificado	04
06	Ensayo CBR	04
07	Ensayo de compresión triaxial UU	04 (02 réplicas)

La muestra se seleccionó con el método de cuarteo manual, y se asumió que la unidad de muestra es la misma que la unidad de análisis. Las muestras fueron sometidas a pruebas de EMS en laboratorio, tanto para el suelo de grano fino y suelo granular grueso en una cantidad fijada por el tipo y cantidad de ensayos a realizar en cada suelo, como se detalla en la tabla anterior.

3.5 Hipótesis:

3.5.1 Hipótesis General

El uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos generan efectos incrementales significativos de resistencia al corte en el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima.

3.5.2 Hipótesis –Específico.

- El efecto del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en los parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima bajo esfuerzos de compresión triaxial UU es significativo.
- La capacidad portante del suelo crítico se incrementa hasta porcentajes superiores a 200% con el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima a través del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos.
- Al menos, una combinación de un método de estabilización y un tipo de suelos para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima logra alcanzar superar el 150% del índice CBR.

3.6 Operacionalización de variables:

Se definió que un mejoramiento de un terreno, a través de la estabilización de suelos, depende de la variación de ésta, y básicamente por medio de factores (variables), como los métodos de estabilización y tipos de suelos. Por lo tanto, las variables independientes (variables categóricas) y dependientes serán:

Variable independiente (X_i):

X_1 : métodos de estabilización

X_2 : tipos de suelos

Variable dependiente (Y):

Y: Mejoramiento de terreno

De los cuales se formula la operacionalización de cada una de las variables en las siguientes tablas:

Tabla 5: Matriz de operacionalización de variable independiente

DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	Ítems	Fuentes	TÉCNICA/ INSTRUMENTO	METODOLOGÍA
VARIABLE INDEPENDIENTE (X_1): MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN							
Consiste en dotar a los mismos de la resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la incorporación de otro suelo a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea, el mecanismo de estabilización es seguido de un proceso de compactación. (Manual de Suelos y Pavimentos MTC, pág. 92).	De acuerdo al procedimiento y/o naturaleza del origen del método, está dado por las siguientes categorías: - Estabilización mecánica. - Estabilización física - Estabilización química. - Estabilización térmica - Estabilización eléctrica.	- Estabilización mecánica. - Estabilización química.	- Optimo contenido de humedad. - Densidad seca máxima. - Plasticidad - Tipo de aditivo (%). - Optimo contenido de humedad. - Densidad seca máxima. - Plasticidad	¿Cómo identifico un método de estabilización mecánica para la mejora del terreno? ¿Cómo identifico un método de estabilización química para la mejora del terreno?	El terreno	Técnica: Observación Instrumento: - Ficha técnica de observación y control EMS. - Cuaderno de apuntes - Cámara fotográfica.	- Ensayo: NTP 339.129 - Ensayo: NTP 339.141 - Ensayo: NTP 339.129 - Ensayo. - Ensayo: NTP 339.129 - Ensayo: NTP 339.141 - Ensayo: NTP 339.129
VARIABLE INDEPENDIENTE (X_2): TIPOS DE SUELOS							
Los suelos con propiedades similares pueden ser clasificados en grupos y subgrupos en función de las características mecánicas y su comportamiento para la ingeniería (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015).	Según SUCS, los tipos de suelos pueden clasificarse en dos grandes categorías: 1. Suelos granulares gruesos. 2. Suelos de grano fino.	- Suelo granular grueso. - Suelo de grano fino.	- Humedad natural - Densidad natural - Granulometría - Plasticidad - Clasificación - Peso Específico - Humedad natural - Densidad natural - Granulometría - Plasticidad - Clasificación - Peso Específico.	¿Cómo identifico un tipo de suelo granular grueso para la mejora del terreno? ¿Cómo identifico un tipo de suelo de grano fino para la mejora del terreno?	El terreno	Técnica: Observación Instrumento: - Ficha técnica de observación y control de EMS. - Cuaderno de apuntes - Cámara fotográfica.	- Ensayo: NTP 339.127 - Ensayo: NTP 339.143 - Ensayo: NTP 339.128 - Ensayo: NTP 339.129 - Ensayo: NTP 339.134 Ensayo: NTP 339.131 - Ensayo: NTP 339.127 - Ensayo: NTP 339.143 - Ensayo: NTP 339.128 - Ensayo: NTP 339.129 - Ensayo: NTP 339.134 - Ensayo: NTP 339.131

Tabla 6: Matriz de operacionalización de variable dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE (Y): MEJORAMIENTO DE TERRENO							
DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	Ítems	Fuentes	TÉCNICA/ INSTRUMENTO	METODOLOGÍA
Se entenderá por mejoramiento o refuerzo del terreno como el incremento de sus propiedades resistentes o de rigidez para poder apoyar sobre él adecuadamente cimentaciones, viales o servicios	El mejoramiento estructural del terreno se medirá con gran incidencia en el incremento de la resistencia al corte.	- Capacidad de resistencia estructural al corte.	- Resistencia al corte - Cohesión - Ángulo de fricción Interna - Porcentaje de Índice de CBR. - Capacidad de Carga	¿Cuáles son las propiedades que determinan el mejoramiento de terreno?	El terreno	Técnica: Observación Instrumento: - Ficha técnica de observación y control de EMS. - Cuaderno de apuntes - Cámara fotográfica.	- Ensayo: NTP 339.164 - Ensayo: NTP 339.164 - Ensayo: NTP 339.164 - Ensayo: NTP 339.141 - Teoría de Meyerhof para suelo estratificado caso especial: suelo fuerte sobre suelo débil (terreno mejorado sobre suelo débil).

3.7 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

(Arias, 2012), afirma que, “una vez efectuada la operacionalización de las variables y definidos los indicadores, es hora de seleccionar las técnicas e instrumentos de recolección de datos pertinentes para verificar las hipótesis o responder las interrogantes formuladas. Todo en correspondencia con el problema, los objetivos y el diseño de investigación”.

De lo anterior, se prosiguió elegir las técnicas e instrumentos de la investigación de campo y/o laboratorio, así como, de investigación documental, y, principalmente, las técnicas de la disciplina de la Mecánica de Suelos y la Ingeniería Geotécnica.

3.7.1 Técnicas de recolección de datos

Según (Arias, 2012), define a la técnica de investigación como “el procedimiento o forma particular de obtener datos o información”.

Por el contexto de la investigación, presenta varias técnicas que emergen y se identifican en tres escenarios distintos, y se describen de la siguiente manera:

3.7.1.1 Investigación documental

Se revisaron materias de interés de la formulación del problema, objetivos, hipótesis y ejecución de la misma y hasta conceptos concernientes y pertinentes dentro del estudio. Del cual (Arias, 2012), resalta dos técnicas que se aplicaron, y son:

- a. Análisis documental:** Está referido al análisis y recojo sistemático de libros, artículos, revistas, tesis y otros relacionados al tema de interés. Éstos se revisaron en los centros de almacén, difusión, clasificación y servicio de información al usuario de información documentada como:

a.1.- Bibliotecas físicas:

Se accedió y registró el acervo documentario del tema de interés de las bibliotecas generales y especializadas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, la Universidad Nacional de Ingeniería y la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

a.2.- Bibliotecas virtuales y/o buscadores informáticos:

Se accedió y se registraron documentos de información digital, como tesis, artículos y libros concernientes al tema de investigación, en páginas como:
<https://alicia.concytec.gob.pe/vufind>; <https://scholar.google.com.mx>;

<https://dialnet.unirioja.es>; <https://www.redalyc.org>; <https://issuu.com>;
<https://scielo.org/es>; <https://www.academia.edu>; <https://worldwidescience.org>.

- b. Análisis de contenido:** Está referido al análisis, valoración y el recojo de la temática de interés de la investigación en forma puntual, focalizada y organizada.

3.7.1.2 Investigación en campo

Se visitó in situ el lugar de investigación, principales laboratorios de mecánica de suelos de la región de Lima, centros de investigación, centros de producción de aditivo estabilizador de suelos y canteras de producción de material seleccionado para la construcción. Del que se identifican técnicas como:

- a. Observación:** Según (Arias, 2012), “ es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos”.

De esta técnica, se realizó, de forma rígida, la observación estructurada dentro de los protocolos, guías y formatos de la Mecánica de suelos en dos lugares de interés de la investigación, y corresponde a:

a.1.- Área de estudio:

Es el terreno de la refinería La Pampilla del proyecto de instalación del tanque para el almacenamiento de hidrocarburos, en la que se realizó la exploración de suelos a nivel geotécnico para la recolección de información y datos de campo.

a.2.- Centro de Investigación técnico científica:

Se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina para el procesamiento de la información de campo y la investigación del experimento del estudio.

- b. La entrevista:** Según (Arias, 2012), afirma que es procedimiento de conversación directa entre el interrogante y el consultado sobre un tema predeterminado.

Se practicó la entrevista “No” estructurada a los técnicos, especialistas y científicos con preguntas como: ¿qué métodos de estabilización? y ¿qué tipos de suelos? Se utilizan para el mejoramiento de terreno de cimentaciones en tanques; y se acudió a los principales centros de investigación técnico científica, como:

- Provías Nacional, dependencia del Viceministerio de Transportes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

- Dirección de Estudios Especiales, dependencia de la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles del Ministerio de Transportes y Comunicaciones
- Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Laboratorio de Mecánica de Suelos del Departamento de Ordenamiento Territorial de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.7.1.3 Investigación en laboratorio

En este escenario, más focalizado y centralizado, se practicaron de forma rígida las técnicas propias de la observación estructurada de un estudio de mecánica de suelos (EMS), y la técnica de la entrevista “No” estructurada constante con los técnicos especializados, especialistas académicos y el jefe de laboratorio.

3.7.2 Instrumentos de recolección de datos

Son los medios físicos, electrónicos, mecánicos, informáticos u otros, por el cuales se recopiló y registró los datos de forma organizada y sistematizada para los fines convenientes del tema de investigación.

3.7.2.1 Instrumentos del análisis documental

Se tienen a las fichas de registro, el cuaderno de apuntes y la computadora y sus respectivas unidades de almacenaje.

3.7.2.2 Instrumentos del análisis de contenido

Se tienen al cuaderno de apuntes, archivos de procesamiento de información como el Word, Excel, Auto Cad y otros.

3.7.2.3 Instrumentos físicos de la observación

- Libreta de campo y/o cuaderno de datos.
- Fichas técnicas de observación y control de laboratorio.
- Fichas de ensayo.
- Cuaderno de apuntes textuales, comentarios bibliográficos, etc.
- Cámara fotográfica.

3.7.2.4 Instrumentos de la entrevista

Se tiene como instrumento al cuaderno de apuntes y/o libreta de notas.

3.7.2.5 Instrumentos físicos y mecánico electrónicos

Se utilizaron medios físico mecánico electrónicos de mecánica de suelos, y son:

- Equipo de compresión triaxial y accesorios.
- Prensa de carga CBR y accesorios.

- Aparatos de ensayo de Proctor modificado.
- Horno
- Aparatos de casa grande.
- Vibrador de tamices.
- Balanza mecánica.
- Balanza electrónica.
- Termómetro.
- Vernier.
- Regla milimétrica.
- Flexómetro.
- Cuarteador mecánico.
- Cono de arena.
- Gps, y entre otros.

3.7.2.6 Instrumentos informáticos

Dentro de los instrumentos se utilizó software, aplicaciones y programas como:

- Auto Cad 2019
- Microsoft Word 2016
- Microsoft Excel 2016
- TexStudio
- MikTex
- Minitab 17
- Paint
- PLAXIS 2D, y entre otros.

3.7.3 Técnicas estadísticas

Se procesó el análisis de datos cuantitativos a través de la Estadística Descriptiva e Inferencial mediante herramientas informáticas de software y aplicativos como el MS Excel 2016 y programas computacionales como el Minitab.

Y para el que fueron aplicadas pertinentemente en cada análisis respectivo.

3.7.3.1 Técnica de Estadística Descriptiva

Esta técnica se efectuó para realizar las gráficas de las comparaciones de los resultados de los datos recolectados y procesados, a través de tabulaciones, cuadros comparativos, histogramas, gráficos de líneas y porcentajes de los datos de las variables. De las que se interpretaron estadísticamente los resultados por medio de su visualización.

3.7.3.2 Técnica de Estadística Inferencial

Se utilizó con la finalidad de validar y hacer las inferencias de las variables utilizadas a través del ANOVA (análisis de varianza) y los estadígrafos en el diseño de arreglo factorial, con el propósito de probar la hipótesis planteada de la investigación.

3.8 Desarrollo del trabajo de tesis

Se procedió según a los ítems de la investigación, basados en función a la formulación del problema, hipótesis y objetivos; y se prosiguió en el siguiente orden:

3.8.1 Consideraciones preliminares

Nos sirvió como respaldo y asidero en el planteamiento de la investigación experimental para lograr los objetivos planteados. Y dentro de ellos, se tiene lo siguiente.

3.8.1.1 Descripción general del proyecto

El proyecto “Construcción de nuevas esferas de GLP y almacenamiento de turbo y residual de propiedad de Refinería La Pampilla - Ventanilla, Callao”, contempló la implementación de construcción de nuevas estructuras como: dos esferas de 22 m de diámetro, apoyadas en 12 patas; una esfera de 19 m de diámetro, apoyada en 10 patas; un tanque de residual de 48.30 m de diámetro y 19.20 m de altura; dos tanques de turbo de 35.1 m de diámetro y 19.20 m de altura; área de bombas, área de Chiller (sistema de aire acondicionado), área de unidades de recuperación de vapor (VRU); muros perimetrales de concreto armado de altura de 2.30 m. para contención; del cual, se evaluó sólo la estructura más crítica que demandó mayor resistencia del terreno.

3.8.1.2 Estudio topográfico

(UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017), describe que la Refinería La Pampilla está ubicada frente a la carretera a Ventanilla Km. 25, en el Distrito de Ventanilla - Callao, y tiene área de 30 000.00 m² de relieve plano como se aprecia en la figura adjunta (véase anexo de plano topográfico); del cual, para nuestro estudio, se limitó al área de influencia de la estructura a evaluar.

Figura 8: Vista en planta del terreno de la Refinería La Pampilla



Fuente: Google Earth

3.8.1.3 Exploración del suelo

Fue realizado por la Universidad Nacional Agraria La Molina, a través del laboratorio de mecánica de suelos, en la que se acompañó en el proceso y nos permitió conocer y formular el problema de la investigación, y comprendió lo siguiente:

A. Estudio geofísico

Está referido, al ensayo No destructivo del tipo indirecto, de los sondajes eléctricos verticales y refracción sísmica del estado geológico-geotécnico, cuya información, referenció complementariamente, la estratigrafía del lugar.

(UNALM/FIA/DOT-C Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017), planteó tres ensayos de refracción sísmica LS (lado izquierdo de la vista fotográfica, a través del tendido de cables sísmicos y generación de ondas sísmicas), y dos ensayos de sondaje eléctrico vertical SEV (lado derecho de la vista fotográfica, a través de equipo de resistividad eléctrica); y sostiene que, de acuerdo a la variación de Velocidades (V_p) en profundidad, para las áreas de estudio, interpretó e identificó 3 capas muy definidas, cuyos resultados tienen una aproximación aceptable; sin embargo, recomienda contrastar con la precisión de los ensayos directos con un análisis detallado de calidad de suelo.

Figura 9: Estudio de refracción sísmica (lado izquierdo) y sondaje eléctrico vertical (lado derecho)



Fuente: (UNALM/FIA/DOT-C Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017, págs. 23,27)

B. Estudio geotécnico

(UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017), consideró explorar nueve (09) calicatas de profundidad máxima de 2.50 m en el área de Tanque de almacenamiento de Turbo y Residual (C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6, C-7, C-8 Y C-9) y (09) calicatas en el área de Esferas de GLP (C-10, C-11, C-12, C-13, C-14, C-15, C-16, C-17 Y C-18). En las que se ejecutaron ensayos de densidad natural, método del “Cono de Arena” en cada una, y en las calicatas se efectuaron ensayos de “Carga Directa” con placa de 1 pie de lado; estos ensayos fueron de carga directa vertical y de carga directa

horizontal. De todos éstos ensayos, se ilustran representativamente en la gráfica adjunta los ensayos de perforación del pozo P-3 y apertura de calicatas C-2 y C-10.

Figura 10: Ensayo de perforación diamantina P-3 y su testigo extraído



Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

Figura 11: Ensayos de excavación directa de calicatas C-2 y C-10



Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

También presenta la exploración de nueve (09) perforaciones en el área correspondientes a tanques para el almacenamiento de Turbo y Residual (P-1, P-2, P-3, P-4, P-5, P-6, P-7, P-8 Y P-9) y nueve (09) perforaciones en el área de tanques tipo Esferas de GLP (P-10, P-11, P-12, P-13, P-14, P-15, P-16, P-17 Y P-18); los cuales se efectuaron por el método rotativo con extracción continua de testigos. Se utilizaron brocas NQ con enfundado HQ. Alcanzaron una profundidad mínima de 23 m. Además, en cada perforación se efectuaron ensayos de “Penetración Estándar” distanciados a 1.50 m (SPT), CPT y Cono de Punta ciega (Cono PECK); y, así mismo, se efectuaron ensayos de permeabilidad tipo Lefranc y se detallan representativamente algunos de estos ensayos con vistas fotográficas en la figura adjunta.

En resumen, el estudio geotécnico contempló los siguientes ensayos como se aprecia en la tabla adjunta (véase anexo de plano geotécnico).

Tabla 7: Cantidad y tipos de ensayos del estudio geotécnico

Ensayo	Número	Norma
Análisis granulométrico	105	NTP 339.128 (ASTM D 422)
Análisis granulométrico por hidrómetro	7	NTP 339.128 (ASTM D 422)
Límites de consistencia	105	NTP 339.129 (ASTM D 4318)
Humedad Natural	105	NTP 339.127 (ASTM D 2216)
Densidad Natural	36	NTP 339.143 (ASTM D 1556)
Método del cono de arena	36	NTP 339.143 (ASTM D 3080)
Clasificación SUCS	104	NTP 339.134 (ASTM D 2485)
Compresión simple no confinada	5	NTP 339.167 (ASTM D 2166)
Compresión triaxial No consolidado No drenado	5	NTP 339.164 (ASTM D 2850)
Próctor modificado	7	NTP 339.141 (MTC E-115)
C.B.R.	7	MTC E-132 (ASTM D 1883)
Gravedad específica de sólidos	7	NTP 339.131 (ASTM D 854)
Hinchamiento de Lambe	6	NTP 339.170 (ASTM D 4546)
Consolidación unidimensional	4	NTP 339.154 (ASTM D 2435)
Densidad máxima	3	NTP 339.137 (ASTM D 4253)
Densidad mínima	3	NTP 339.138 (ASTM D 4254)
Prueba de carga horizontal	6	AASHTOT222
Prueba de carga vertical	6	NTP 339.13 (ASTM D 1194)
Permeabilidad Lefranc	4	ASTM D 4631
S.P.T.	78	NTP 339.133 (ASTM D 1586)
Contenido de cloruros solubles en agua y suelo	6	NTP 339.177 (ASTM D 512)
Contenido de sulfatos solubles en agua y suelo	6	NTP 339.178 (ASTM D 516)
Contenido de carbonatos	6	ASTM D 511
Contenido de materia orgánica	6	NTP 339.072
PH	6	

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

(UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017), presenta las siguientes conclusiones:

- Los suelos están constituidos por un depósito potente de material granular de origen fluvioaluvional compuesto por cantos rodados de bolonería con una matriz de grava arenosa. Su disposición no es uniforme, variando su profundidad desde 2.00 m con respecto a la superficie del terreno hasta 7.00 m de profundidad donde se encuentra el nivel del mar. Su compacidad varía de alta compacidad con una densidad de 2.09 a 2.11 Tn/m³, una compacidad relativa de 70% a más y un ángulo de fricción interna de 36.1° en la parte superior. Según los resultados de los estudios geofísicos, se extiende hasta los 33.00 m de profundidad, donde aparecen algunos afloramientos con roca fragmentada.
- Sobre el conglomerado fluvioaluvional se han depositado sedimentos finos y gruesos, formando pequeños estratos y lentes dispuestos erráticamente, compuesto por limos arenosos, arenas limosas, gravas arenosas, limosas y también finos plásticos compresibles. Estos sedimentos tienen densidades que varían entre 1.24 Tn/m³ a 1.90 Tn/m³, lo que hace que sus propiedades mecánicas sean muy variables en el área de estudio.
- Los ensayos de compresión triaxial dieron valores aleatorios del ángulo de fricción interna, desde 13.4° hasta 21.0°, así como su cohesión aparente.

A partir del estudio geotécnico, se desarrolló el perfil estratigráfico del área de influencia de la estructura seleccionada, de forma acotada y focalizada a fines de la investigación (véase anexo del plano de perfil estratigráfico).

3.8.1.4 Consideraciones en la selección de la estructura

Descripción

Las estructuras de tanques están sometidas a diversas cargas como las muertas por peso propio, vivas por el contenido del líquido, sísmicas, de viento, térmicas y cargas hidrodinámicas (impulsivas y convectivas); sin embargo, para nuestro estudio, se limita a cargas de servicio estáticas, y, a partir de ello, se tiene el siguiente análisis.

Análisis

- Para encontrar un método de mejoramiento de terreno adecuado, es preciso encontrar el más significativo, y para ello es necesario evaluar bajo las condiciones más desfavorables o críticas.

- Del proyecto en estudio se tienen las estructuras más relevantes, con sus cargas estáticas de servicio para su evaluación, como se detalla en el cuadro adjunto.

Tabla 8: Datos técnicos de las estructuras proyectadas

Ítem	Peso de estructura, Tm	Peso lleno de agua, Tm	Peso Total, Tm
Esfera de 35 MBbl	700	5,560	6,260
Esfera de 23 MBbl	415	3,650	4,065
Tanque gasolina 110 MBbl	440	17,500	17,940
Tanque residual 220 MBbl	670	35,000	35,670

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

- De todas las estructuras proyectadas, se observa que el tanque residual de 220 MBbl, de $D_t = 48.30$ m de diámetro y $H_t = 19.20$ m de altura, es el de mayor tamaño con respecto a las demás, y, por ende, ofrecerá mayor carga de servicio, que originará condiciones más críticas a un sistema de suelo mejora.

Conclusiones

- De la estructura a evaluar, se concluyó que, la estructura de gran tamaño del tanque residual, generará la condición más crítica respecto a las otras, pues ésta demandará mayor resistencia del suelo mejorado en estudio. Por lo tanto, se recomienda evaluar esta estructura de mayor carga de servicio.

3.8.1.5 Evaluación de técnicas de mejoramiento de terreno

Descripción

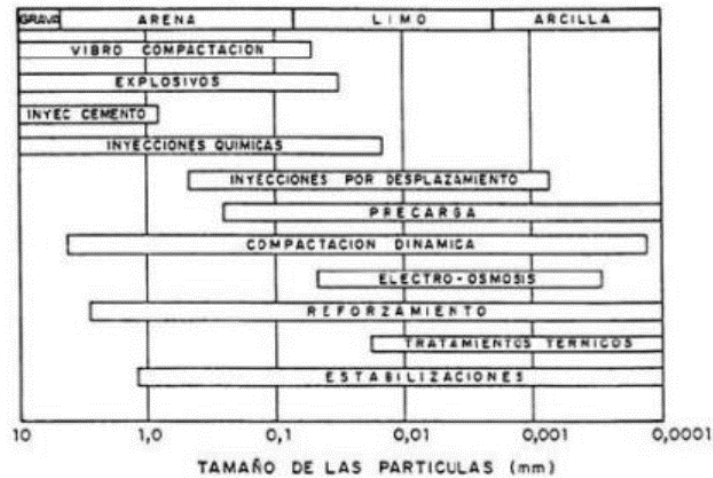
Existe una variedad de técnicas de mejoramiento de terreno, que según al contexto del problema, condiciones geotécnicas críticas del terreno, normas, investigaciones y experiencias de mejora de suelos en cimentaciones de este tipo de estructuras se presenta el siguiente análisis.

Análisis

- (Documento Básico SE-C Seguridad Estructural: Cimientos, 2019, pág. 98), considera identificar varios factores; sin embargo, consideramos como preponderantes para nuestro interés los siguientes: “el espesor y propiedades del suelo o relleno a mejorar, presiones intersticiales en los diferentes estratos, y la naturaleza, tamaño y posición de la estructura a apoyar en el terreno”, para evaluar adecuadamente una técnica de mejora de suelos como la estabilización por sustitución, compactación dinámica u otro procedimiento.

- Por el tipo de estructura, (American Petroleum Institute, 2012), presenta recomendaciones de métodos generales sobre la cimentación en terreno de suelos desfavorables para el mejoramiento del terreno, como:
 - a. Retirar el material objetable y reemplazarlo con material compactado adecuado.
 - b. Compactación del material blando con pilotes cortos.
 - c. Compactación del material blando, precargando el área con una sobrecarga de tierra. Se pueden usar desagües de tiras o arena junto con este método.
 - d. Estabilización del material blando por métodos químicos o inyección de lechada de cemento.
 - e. Transferir la carga a un material más estable debajo de la subrasante mediante la conducción de pilotes o la construcción de pilares de cimentación. Este consiste en construir una losa de hormigón armado sobre los pilotes para distribuir la carga del fondo del tanque.
 - f. Construir una base de losa que distribuirá la carga sobre un área suficientemente grande del material blando para que la intensidad de la carga esté dentro de los límites permitidos y no se produzca un asentamiento excesivo.
 - g. Mejora de las propiedades del suelo mediante vibrocompactación, vibroreemplazo o compactación dinámica profunda.
 - h. Llenado lento y controlado del tanque durante la prueba hidrostática. Cuando se usa este método, la integridad del tanque puede ser comprometida por asentamientos excesivos del caparazón o del fondo. Por esta razón, los asentamientos del tanque deberán ser monitoreados de cerca. En caso de asentamientos más allá de los rangos establecidos, es posible que se deba detener la prueba y volver a nivelar el tanque.
- (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017), recomienda mejorar el terreno para la cimentación de un tanque ($D_t = 48.30$ m y $H_t = 19.20$ m) del proyecto en estudio, con un collarín perimetral de material granular grueso tipo GM (ancho de 2.50 m y profundidad mínima de 2.50 m) en la base del tanque, con el fin de lograr la falla cortante en suelo mejorado.
- Según Mitchell (1981), citado en (Maza Palop, 2020, pág. 84), sostiene que el tamaño de partículas cumple un factor condicionante preponderante para seleccionar más o menos un tipo de mejora de terreno del cual se tiene:

Figura 12: Rango de aplicación de técnicas de mejoramiento en función al tipo y tamaño de suelo



Fuente: Mitchell (1981)

- Del mismo modo, para el mismo lugar de estudio, refinería La Pampilla (Aranda Burckhardt, 2011), propone la mejora del terreno para una cimentación de un tanque ($D_t = 21$ m y $H_t = 14.40$ m), bajo el método de sustitución del suelo inadecuado con material de suelo granular grueso bajo una compactación en capas, cada 20 cm, en 3 m de profundidad y en todo el área del diámetro del tanque más un ancho de 6 m adicional.
- De las recomendaciones anteriores, del uso de métodos de estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno para este tipo de estructuras, se tiene que, en nuestro país, existe mayor información y aplicación favorable en el mejoramiento de superficie de rodadura (afirmado) o para bases y sub bases de las infraestructuras viales pavimentadas.

Síntesis y Conclusión

- De las experiencias y recomendaciones en la mejora de terreno para cimentaciones de tanques en suelos desfavorables, se concluye que la técnica del método de estabilización de suelos es una alternativa de mayor aplicación y recomendación, y es avalada sobre todo por la norma API 650. Por lo tanto, se recomendó evaluar esta técnica en el presente estudio.
- De la función del tamaño de partículas como factor influyente en la mejora del terreno, se concluye que la estabilización abarca al 100% en limos y arcillas y un 50% en arenas en su uso; por lo tanto, esta técnica tiene mayor alcance, y amerita su evaluación.
- De los métodos de estabilización a evaluar, como técnica de mejora de terreno, se concluye que son factibles dos recomendaciones extraídas de la norma API 650, y

son: retirar el material objetable y reemplazarlo con material adecuado y compactado; y estabilización del material blando por métodos químicos o inyección de lechada de cemento. Por consiguiente, se recomendó evaluar estos dos métodos, que corresponden a dos categorías como la mecánica y la química definidas por (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015, pág. 266). Por lo tanto, se recomienda definir y evaluar estos dos métodos de estabilización.

- De los tipos de suelos a utilizar en los diferentes métodos de estabilización, se concluye que la norma API 650, considera el uso de suelo granular grueso para el método por sustitución y suelo de grano fino propio del lugar para el método por compactación o estabilización química. Por lo tanto, se recomienda evaluar estos dos tipos de suelos.

3.8.1.6 Evaluación de la estabilización mecánica con material propio.

Descripción

De las consideraciones en las conclusiones del numeral 3.8.1.5, el método de la estabilización mecánica asociada con el material propio (ya sea suelo de grano fino o suelo granular grueso) es una alternativa recomendada a tomar en cuenta para su evaluación en este tipo de estructuras, pues es una de las categorías más utilizadas desde tiempos muy remotos. Por lo que, de la exploración de suelo del numeral 3.8.1.3, se tiene que dentro de nuestra área focalizada de influencia (con calicatas de exploración C-3, C-4, C-6 y C-7) del tanque propuesto y rango de profundidad de estudio ($h = 3.0 \text{ m @ } 5.0 \text{ m}$), se identificó suelo de grano fino en su mayoría y se evaluó si es factible o no su uso, considerando características geotécnicas, antecedentes, investigaciones, normas y experiencias similares; y se presenta el siguiente análisis:

Análisis

- La estabilización en carreteras no pavimentadas, a nivel de “Afirmado”, según (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014, pág. 11), considera el uso de tres materiales como suelo granular propio del lugar, suelo granular procesado como material de préstamo y suelo natural con aditivo. Los dos primeros materiales corresponden a estabilizaciones mecánicas y el tercero es propio de la estabilización química.
- Según el contexto geotécnico del sitio (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017), tiene identificado variedad de suelos en toda el área, con disposición variable y errática a nivel estratigráfico como superficial (véase tablas adjuntas y anexo de planos geotécnicos).

Tabla 9: Propiedades de suelos de calicatas C-01, C-02 y C-03 de la zona de estudio de La Pampilla

Sondaje		C – 01		C – 02		C – 03	
Profundidad	m	0.00-1.50	1.50-2.50	0.00-1.50	1.50-2.50	0.00-1.50	1.50-2.50
Índice de plasticidad	IP%	21	6	31	11	13	28
Cohesión aparente	C (kg/cm ²)	-	-	-	-	-	-
Ángulo de fricción interna	Φ	-	-	-	-	-	-
C.B.R. al 95 %	%	-	-	-	-	-	2.95
C.B.R. al 100 %	%	-	-	-	-	-	3.39
Clasificación	SUCS	MH	GM con arena	CH	SC	ML con arena	CH con arena

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017).

Tabla 10: Propiedades de suelos de calicatas C-04, C-05 y C-06 de la zona de estudio de La Pampilla

Sondaje		C – 04		C – 05		C – 06	
Profundidad	m	0.00-1.50	1.50-2.50	0.00-1.50	1.50-2.50	0.00-1.50	1.50-2.50
Índice de plasticidad	IP%	3	35	18	6	25	9
Cohesión aparente	C (kg/cm ²)	-	0.44	-	-	-	0.62
Ángulo de fricción interna	Φ	-	13.50	-	-	-	21.00
C.B.R. al 95 %	%	-	-	-	-	-	-
C.B.R. al 100 %	%	-	-	-	-	-	-
Clasificación	SUCS	ML	CH	CL con arena	GM con arena	CH	CL arenoso

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017).

Tabla 11: Propiedades de suelos de calicatas C-07, C-08 y C-09 de la zona de estudio de La Pampilla

Sondaje		C – 07		C – 08		C – 09	
Profundidad	m	0.00-1.50	1.50-2.50	0.00-1.50	1.50-2.50	0.00-1.50	1.50-2.50
Índice de plasticidad	IP%	4	19	18		11	19
Cohesión aparente	C (kg/cm ²)	-	-	-	-	-	-
Ángulo de fricción interna	Φ	-	-	-	-	-	-
C.B.R. al 95 %	%	-	4.12	-	-	-	3.90
C.B.R. al 100 %	%	-	5.03	-	-	-	4.53
Clasificación	SUCS	ML	CL arenoso	CL	GP con arena	ML	CL con arena

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017).

Por lo tanto, el suelo no es adecuado y favorable como material de uso para la estabilización mecánica; no obstante, ante este inconveniente, emergió el planteamiento del método de combinación de suelos de forma parcial, pues se diseñó un suelo equivalente homogéneo del terreno, a partir de combinar únicamente los suelos existentes, y, de esta manera, analizar los efectos que pueda alcanzar en la mejora de suelos.

- El diseño de suelo equivalente homogéneo demandó ensayos piloto para su evaluación como material en la estabilización mecánica; es decir, obtener un suelo uniforme en el área de influencia del sub suelo del tanque proyectado, por lo que se propuso la mezcla de suelos de los diferentes puntos de exploración de las calicatas dentro del área de dominio del tanque proyectado en estudio.

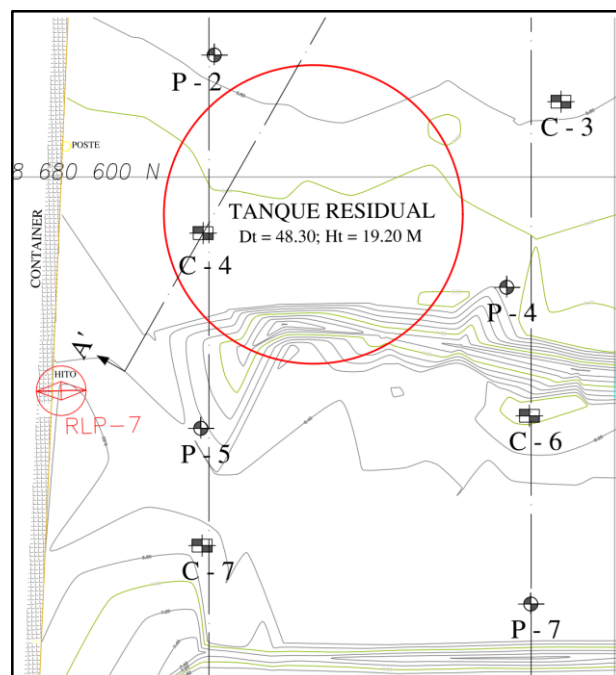
- En el ensayo piloto, se tomaron cuatro (04) muestras representativas (20 Kg de cada calicata C-03, C-04, C-06 y C-07), ubicadas dentro del ratio de influencia del tanque proyectado para obtener el suelo mezclado (80 Kg), y del que se obtuvo un suelo de grano fino (CL), tal como se aprecia en las tablas e ilustraciones adjuntas.

Tabla 12: Propiedades de suelos de calicatas del área de influencia del tanque estudiado

Propiedades	Unid.	C - 03	C - 04	C - 06	C - 07
Profundidad	m	1.50 - 2.50	1.50 - 2.50	1.50 - 2.50	1.50 - 2.50
Plasticidad					
Límite líquido	LL(%)	55	63	28	45
Límite plástico	LP(%)	28	28	19	25
Índice de plasticidad	IP (%)	28	35	9	19
Humedad natural	W (%)	31.20	23.15	8.20	26.22
Densidad natural	γ (gr/cc)	1.57	1.38	1.71	1.62
Densidad suelo seco	γ_d (gr/cc)	1.21	1.08	1.47	1.29
Cohesión aparente (C)	Kg/cm2	-	0.44	0.62	-
Ángulo de fricción interna " ϕ "	Grados	-	13.50	21.00	-
Densidad seca máx.	(gr/cc)	1.73			1.77
Humedad óptima	Wop (%)	17.30			16.95
C.B.R. al 95 %	%	2.95	-	-	4.12
C.B.R. al 100 %	%	3.39	-	-	5.03
Clasificación	SUCS	CH C/arena	CH	CL arenoso	CL arenoso

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

Figura 13: Vista de plano geotécnico con ubicación de calicatas en área de influencia del tanque



Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

Figura 14: Muestras representativas y mezclado del suelo equivalente



Síntesis y Conclusiones

- Del suelo del terreno en su condición natural como material para la estabilización mecánica, considerando la filosofía de los métodos en carreteras no pavimentadas (afirmado), se concluyó que no es factible su uso en su estado actual por ser heterogéneo de forma variable y errática a nivel vertical y superficial.
- De la factibilidad de uso del material propio del terreno previo tratamiento, se concluye que es factible parcialmente, dado que el resultado del tratamiento es incierto en lograr un suelo homogéneo y aplicar el método de estabilización por combinación de suelo con otro material de préstamo u adición de algún aditivo; sin embargo, por cuestiones académicas de investigación experimental, se recomendó plantear un suelo equivalente homogéneo, a través de la mezcla de suelos de cuatro puntos (muestras de calicatas C-03, C-04, C-06 y C-07), del área de influencia del tanque proyectado.
- De la mezcla de suelos (suelo equivalente homogenizado), se concluyó que resultó un tipo de suelo de grano fino (CL); por lo tanto, se recomendó evaluar su uso como una alternativa de material para la estabilización mecánica o química en la cimentación de este tipo de estructuras; dado que este tipo de suelos tiene recomendaciones y antecedentes favorables en su tratamiento; asimismo, forma parte del criterio de la investigación de evaluar un tipo de suelo de grano fino, y que presenta las siguientes propiedades, como se detalla en la tabla ajunta.
- Del método específico aplicado en la obtención de suelo equivalente homogéneo y su respectivo reemplazo del existente, se concluye que es mixta, pues se referencian métodos específicos de una estabilización parcial por combinación de suelos y por sustitución, los cuales forman parte de una estabilización mecánica.

Tabla 13: Propiedades índice del suelo equivalente homogenizado (mezclado).

Propiedades	Unid.	Suelo mezclado (C-03,C-04,C-06 y C-7)
Profundidad	m	1.50 - 2.50
Plasticidad		
Limite liquido	LL(%)	46.40
Limite plástico	LP(%)	18.97
Índice de plasticidad	IP (%)	27.43
Humedad natural	W (%)	-
Densidad natural	γ (gr/cc)	-
Densidad suelo seco	γ_d (gr/cc)	1.59
Densidad seca máxima	D.S.M. (gr/cc)	1.85
Humedad óptima	Wop (%)	15.70
Clasificación	SUCS	CL con arena

3.8.1.7 Evaluación de la estabilización mecánica con material de préstamo.

Descripción

De las consideraciones en las conclusiones del numeral 3.8.1.5, el método de estabilización mecánica asociada con un material seleccionado de préstamo o conocido particularmente como estabilización por sustitución, está relacionada mayormente al uso de suelos granulares gruesos, que son procesados y seleccionados en canteras de producción para la aplicación masiva de obras importantes, y es una alternativa recomendada a tomar en cuenta para su evaluación, pues, este método reporta relativamente resultados muy favorables; y, para nuestro estudio, se tuvo en cuenta de acuerdo al contexto de la disponibilidad de canteras de material seleccionado de préstamo de la región de Lima, y asimismo, se tuvo referencias de investigaciones, normas y experiencias similares del sector transportes, y, presenta el siguiente análisis:

Análisis

- Actualmente, de los materiales de estabilización asociados con suelo natural propio (ya sea suelo de grano fino o suelo granular grueso) con o sin aditivo y suelos granulares seleccionados de préstamo con o sin aditivo, utilizados en la estabilización de carreteras no pavimentadas a nivel de "Afirmado", el suelo granular grueso seleccionado de préstamo es de mayor difusión y uso en la región de Lima y el país, por los resultados muy significativos en la mejora de suelos, por lo que existen canteras y/o plantas procesadoras de este material para su uso.

- (American Petroleum Institute, 2012), considera la estabilización mecánica por sustitución con material seleccionado de préstamo (suelo granular grueso) como una de las alternativas de mejora de terreno.
- El material de suelo granular grueso seleccionado de préstamo, utilizado en la estabilización de suelos dentro de la región de Lima, es producido en canteras y/o plantas para distintos propósitos de uso, y son regulados por su diseño y parámetros específicos, referenciados en los manuales de suelos y pavimentos del MTC y la norma AASHTO.
- (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017), recomienda el uso del suelo granular grueso “GM” (véase tabla adjunta), como material seleccionado para el mejoramiento de terreno en este tipo de estructuras, a través de la estabilización mecánica.

Tabla 14: Propiedades geotécnicas de suelo granular grueso recomendado

Composición granulométrica		
Grava	%	49
Arena	%	34
Finos	%	17
Plasticidad		
Límite líquido	LL%	NT
Límite plástico	LP%	NP
Índice de plasticidad	IP%	---
Humedad Natural	W%	2.51
Cohesión aparente	C (kg/cm ²)	0.02
Ángulo de fricción interna	Φ	39.80
Compactación (Próctor Modificado)		
Densidad Seca Máxima	D.S.M. (gr/cc)	2.39
Humedad óptima	Wop(%)	4.51
Densidad Seca Máxima al 95%	(gr/cc)	2.271
C.B.R. al 95 % de la D.S.M.	%	74.81
C.B.R. al 100 % de la D.S.M.	%	>100
Clasificación	SUCS	GM con arena

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

- (Cotos Pérez, 2017) descarta el uso del material seleccionado de un afirmado dentro de la región Lima para las cimentaciones superficiales en tanques, por la inexistencia de éste; y recomienda evaluar otras alternativas de suelo granular grueso, como los materiales de “Sub Base Granular”, material de “Base Granular” y material de “Terraplén”, y que cumplan funciones del material de un “Afirmado”.

Síntesis y Conclusiones

- Del material de suelo granular grueso seleccionado de préstamo, para el uso en la estabilización mecánica por sustitución en la cimentación superficial de un

tanque circular, se concluyó que es factible, propicio y muy recomendado como material homogéneo de reemplazo. Por lo tanto, se recomienda evaluar el uso del suelo granular grueso seleccionado (GM).

- De los métodos de la estabilización mecánica con suelos granulares gruesos, se concluyó que la estabilización por sustitución es un referente a evaluar por las recomendaciones de la norma API 650 y el manual de carreteras del MTC.

3.8.1.8 Evaluación del tipo de estabilización química

Descripción

De las consideraciones en las conclusiones en el numeral 3.8.1.5, el método de estabilización química con un tipo de agente estabilizante asociado a un tipo de suelo (suelo de grano fino o suelo granular grueso) está relacionado su uso a varios factores, pero dependerá principalmente del agente estabilizante y la correspondencia hacia un determinado tipo de suelo; y es una alternativa recomendada a tomar en cuenta para su evaluación en este tipo de estructuras, pues es una de las categorías más utilizadas en carreteras desde el siglo pasado. Por lo tanto, de los suelos predefinidos (suelo de grano fino CL o suelo granular grueso GM), en las consideraciones del numeral 3.8.1.6 y 3.8.1.7 para nuestro estudio, se necesitó evaluar y analizar agentes estabilizantes propicios que tengan correspondencia con estos tipos de suelos. Y dependió, de estos dos últimos, que sus características esenciales y preponderantes se condicionen favorablemente a un tipo particular de agente estabilizante. A su vez, la elección estuvo complementada por otros factores, que se analizaron de acuerdo a la finalidad del uso, experiencias, investigaciones, manuales, economía, disponibilidad, accesibilidad, impacto ambiental y entre otros parámetros climáticos como la humedad, temperatura, la altitud y precipitación, que también influyeron directamente.

Análisis

- (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014, pág. 94), considera tener en cuenta varios factores para seleccionar un tipo de agente estabilizador, y está dado por:
 - Tipo de suelo a estabilizar
 - Uso del suelo estabilizado
 - Tipo de aditivo estabilizador de suelos
 - Experiencia en el tipo de estabilización que se aplicará
 - Disponibilidad del tipo de aditivo estabilizador
 - Disponibilidad del equipo adecuado
 - Costos comparativos

- De otro lado, (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014, págs. 96,97) a través de sus guías para la elección del tipo de agente estabilizante de acuerdo al tipo de suelo, se tiene que para nuestros suelos preestablecidos presenta lo siguiente:
 - Para ambos suelos, la guía referencial recomienda parcialmente el uso del asfalto, cemento portland y cal-cemento-ceniza.
 - Para el suelo granular grueso (GM), la guía complementaria recomienda el uso de aditivos como Aceites Sulfonados, Cloruro de Calcio y Cloruro de Magnesio.
- Según investigaciones del uso de aditivos en algunos suelos de grano fino y suelos granulares gruesos, se tienen las siguientes apreciaciones:
 - (Vera Ibañez & Villanueva Collantes, 2021), analizó el aditivo Terrazyme, obteniendo un incremento del CBR en un 61% para suelos del tipo CL, y concluyó que éste actúa favorablemente para suelos que concentran mayor porcentaje de arcilla en su estructura.
 - (Fernández Gálvez, 2017), analizó el aditivo Terrazyme, en suelos del tipo CL (AASHTO: A-6(10)), y reportó incrementos del índice CBR en un 19% para una concentración de 30 ml/m³.
 - (Quispe Chambi, 2015), estudió el aditivo Perma-Zyme en suelos SC y GC, bajo una dosificación de 1.1 L / 30 m³ de material, y reportó unos incrementos de 30.11% y 40.99% respectivamente, en el índice CBR (95% MDS) 1".
 - (Ccora Montes & Montenegro Santacruz, 2011), estudió el mejoramiento de "Bases" con agentes estabilizadores, como el cemento Portland, cal y emulsión asfálticas sobre suelos del tipo GC (SUCS) con indicadores dadas en el numeral 2.1.2), y reportando al cemento Portland, el que ofrece mejores bondades con respecto a los demás, referidos a los indicadores de CBR y resistencia a la compresión simple.
 - (Ravines Merino, 2010), analizó el aditivo Perma-Zyme 22X, con dosificación de 1.5 L / 30 m³ de material de suelo mezclado (suelo tipo CL: 75% de material de un "Afirmado" (AASHTO: A-1-a) + 25% de suelo arcilloso (AASHTO: A-6)); el cual incrementó los índices de CBR y resistencia hasta un 200%.
 - (Ugaz Palomino, 2006), estudió la estabilización de suelos con diversos agentes estabilizantes como: aditivo orgánico enzimático - Endurazyme; Cal viva; sales - Cloruro de Calcio KIM KD 40; Aceites Sulfonados – CON AID y aditivo inorgánico - RBI Grado 81, y reportando este último con mayor incremento del valor de CBR en 161%, mientras que el Quim KD 40 logra 37% y el CON AID un 117% , y, a su vez, el RBI Grado 81 que se comporta

favorablemente en una amplia gama de suelos, con un notable incremento de la capacidad de soporte de hasta un 600% de CBR en suelo GW-GM.

- Rollins (1998), señala que “la mayor aplicación de TerraZyme realizada al afirmar carreteras, donde hay ondulaciones, baches, presas, etc. Sus demostraciones y aplicaciones exitosas en muchas partes del mundo han ganado una valiosa experiencia en los requisitos de suelo, química, equipos y maquinaria, así como en el método de aplicación del producto”.
- Según la disponibilidad de los agentes estabilizantes en el mercado nacional, certificación y especificaciones técnicas de los mismos para su uso, se tienen:
 - Agentes químicos como estabilizadores tradicionales disponibles en el mercado local, como la cal, cemento Portland, productos asfálticos, sales, etc.
 - Productos químicos comerciales no tradicionales, patentizados y exclusivos para su uso, como ácidos orgánicos e inorgánicos, resinas y polímeros sintéticos u orgánicos, entre otros productos químicos con nuevas tecnologías denominados aditivos químicos estabilizadores de suelos.
- Sobre el agente estabilizador ideal, según (Ugaz Palomino, 2006), sostiene que no existe un agente estabilizante ideal para cualquier tipo, circunstancias y condición climática de un suelo que pueda estabilizarlo; y, a su vez, recomienda el ensayo de “Azul metileno”, que permite determinar la interacción entre el suelo y aditivo, el cual sucede en el instante que se emplea el agua con reacción química, traducándose en la floculación de las partículas finas del suelo.

Síntesis y conclusiones

- De los factores de selección del agente estabilizador, según (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014), se concluyó que el tipo de suelo a estabilizar es el primer factor preponderante dentro del orden de prelación de éstos; es decir, el uso de este insumo dependerá de la correspondencia de éste con el tipo de suelo.
- De las recomendaciones de las guías referenciales y complementarias del manual (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014), se concluyó que existe correspondencia para los suelos predefinidos de grano fino (CL) y suelo granular grueso (GM) con el cemento, cal cemento y cenizas; sin embargo, la aplicación del cemento no le da flexibilidad requerida a la demanda en este tipo de estructuras.
- De las experiencias en investigaciones, se concluyó que existe diversidad de mejoras en las propiedades de resistencia en suelos de grano fino y suelos granulares gruesos con el uso de agentes estabilizantes; de los cuales resaltan los aditivos orgánicos como el Perma-Zyme y el Terrazyme con notables incrementos

sobre suelos de grano fino (CL); pero, con mayor diferencia, el aditivo inorgánico RBI Grado 81, que alcanza incrementar la capacidad de soporte CBR hasta un 600% en suelos GW-GM; sin embargo, no se encontró en el mercado local.

- De la disponibilidad comercial de los agentes estabilizantes, se concluyó que existen variedad de agentes químicos estabilizantes tradicionales y aditivos orgánicos e inorgánicos estabilizantes de suelos con nombre propio, y que tienen certificación y especificaciones técnicas para su uso.
- Del agente estabilizante adecuado para suelos de grano fino (CL) y suelo granular grueso (GM) para evaluar el método de estabilización química en el presente estudio, se concluyó que no se encuentra o no hay un producto químico prototipo ideal para toda clase de suelos; es decir, para su uso con un tipo de suelo, es recomendable verificar su eficiencia. Por lo tanto, se recomendó evaluar el aditivo estabilizador con certificación para su uso, por las siguientes condicionantes: adaptabilidad relativa en distintos tipos de suelos, especificaciones técnicas, certificación de calidad y disponibilidad en el mercado local.

3.8.1.9 Evaluación del aditivo comercial

Descripción

Existe variedad de productos de aditivos estabilizadores, y para la selección del producto comercial a utilizar, se tuvo en cuenta básicamente a factores como los antecedentes favorables y/o especificaciones técnicas de correspondencia a los suelos predefinidos (CL y GM), y la disponibilidad en el mercado local; asimismo las bondades de costo, rendimiento, mínimo impacto ambiental y entre otros.

Análisis

- (Ugaz Palomino, 2006), afirma que el aditivo inorgánico-RBI Grado 81, reporta significativos resultados en todo tipo de suelos; sin embargo, no se encontró disponible en el mercado local. Asimismo, determinó que el aditivo enzimático orgánico Endurazyme no reporta resultados sobresalientes en suelos del tipo CL.
- (Ravines Merino, 2010), determinó incrementos de índice CBR y resistencia hasta un 200% con aditivo Perma-Zyme 22X (1.5 L/30 m³) sobre suelo tipo CL.
- (Fernández Gálvez, 2017) y (Vera Ibañez & Villanueva Collantes, 2021) evaluaron el aditivo Terrazyme en suelos tipo CL, determinando incrementos de índice CBR en un 19% en dosis de 30 ml/m³ y en un 61% en dosis de 33 L/m³, respectivamente.

- Según Rollins (1998), citado por (Vera Ibañez & Villanueva Collantes, 2021, pág. 25), afirma que el aditivo Terrazyme tiene la mayor aplicación exitosa en carreteras, presas y otros.
- De los aditivos Estabilizador Z con “Polímeros” y “Estabilizadores Z” con enzimas no se reportaron antecedentes para los suelos predefinidos de interés.

Síntesis y conclusiones

- De los agentes estabilizantes aditivos, se concluye que presenta relativas mejoras en la resistencia, a través de indicadores de índice CBR en la mayoría de casos.
- Del producto comercial del aditivo a utilizar, se concluye que Terrazyme tiene experiencias y recomendaciones sobresalientes, especificaciones técnicas de correspondencia a distintos tipos de suelos, disponibilidad local, certificación ISO 9002. Por lo tanto, se recomendó utilizar este producto para evaluar la estabilización química con ambos tipos de suelos predefinidos.

3.8.1.10 Evaluación de cantera de suelo granular grueso

Descripción

Los materiales de producción de agregados en canteras son diversos, y para la elección de la cantera de material de suelo granular grueso, se tuvieron en cuenta referencias y experiencias favorables de estos lugares de producción, a través de una evaluación cualitativa de la recopilación de información de campo por medio del recurso de la entrevista “No” estructurada en laboratorios y centros de investigación; asimismo, se tuvo en cuenta el tipo, naturaleza intrínseca y gradación de éstos.

Análisis

- Según referencias del laboratorio de mecánica de suelos de la universidad nacional de ingeniería de Lima (UNI), las regiones de Lima y Callao no cuentan con un mapeo geotécnico de los lugares de extracción y explotación de material selecto de suelo granular grueso para el mejoramiento de terreno.
- (Cotos Pérez, 2017) referencia las principales canteras de este material en la región de Lima como: canteras Carapongo, uso: sub-base, base, fabricación de mezclas Asfálticas en caliente y concretos hidráulicos; cantera La Gloria, uso: terraplén, rellenos, mejoramiento, material filtrante, sub-base, base, mezcla asfáltica, concreto hidráulico; cantera Jicamarca (Unicon), uso: terraplén, rellenos, mejoramiento, material filtrante, sub-Base, base, mezcla asfáltica, concreto hidráulico; cantera Trameq, uso: piedra para mezcla asfáltica en caliente de superficie; cantera Río

- Seco, uso: relleno, sub-base granular, base granular, mezcla asfáltica en caliente de superficie, mezcla de concreto de cemento Portland; cantera Inversiones Minera San Juan, uso: relleno, sub-base granular, base granular, mezcla asfáltica en caliente de superficie, mezcla de concreto de cemento Portland; cantera Leticia, uso: relleno, sub-base granular, base granular, piedra para mezcla asfáltica en caliente de superficie, piedra para mezcla de concreto de cemento Portland, y otros.
- Según las entrevistas en centros técnicos de investigación de Lima, como: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Laboratorio de la Dirección de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), y Laboratorio de Mecánica de Suelos del Departamento de Ordenamiento Territorial de la Universidad Agraria La Molina (UNALM); se referenció a las canteras de Jicamarca y Gloria de forma unánime por la calidad, potencia y producción de éstos; de los cuales, se tienen algunos datos referenciales.

i. Cantera Jicamarca

Ubicación. - Se localiza en el sector denominado Jicamarca lado derecho de la quebrada Jicamarca – Distrito de Lurigancho – Lima

Tipo de material. - Piedra $\frac{1}{4}$ " (confitillo chancado), piedra chancada de $\frac{3}{4}$ " ó $\frac{1}{2}$ ", piedra de zanja o cimentación, arena lavada, arena chancada y arena tierra.

Usos. – En afirmado y concreto.

ii. Cantera Gloria

Ubicación. - Ubicado en el Distrito de Ate, Provincia de Lima y Departamento de Lima, Km 14+800 margen derecho de la Carretera Central.

Tipo de material. - Piedra $\frac{1}{4}$ " (confitillo chancado), piedra chancada de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ", piedra de zanja o cimentación, material granular seleccionado, arena gruesa procesada, arena zarandeada, arena chancada y arena tierra.

Usos. - Concreto, base y afirmado.

Síntesis y Conclusiones:

- De las canteras de material de suelo granular para el uso de mejoramiento de terreno a través de la estabilización de suelos, se concluyó que la región de Lima cuenta con gran cantidad y variedad de canteras de producción para distintos usos.

- De la cantera seleccionada, se concluyó que la cantera Gloria cuenta con buenas referencias y disposición de apoyo técnico a las investigaciones; pues, ésta cuenta con un mecanismo de extracción estandarizada y muy utilizado para distintos usos. Por lo tanto, se recomendó utilizar el material granular grueso de base para evaluar los métodos de estabilización mecánica y química.

3.8.2 Mejoramiento de terreno

3.8.2.1 Planteamiento del mejoramiento de terreno

Además de la estabilización de suelos, existen diversas técnicas como la vibrocompactación, vibroreemplazo (columnas de grava), compactación dinámica profunda, voladuras, inyección de lechada de cemento, drenajes verticales prefabricados, desagües de tiras de arena, mechas de drenaje, lechada de chorro, inyecciones químicas, precarga, estabilización química, estabilización por sustitución, compactación de material blando con pilotes cortos y entre otros; los cuales podrían ser técnicas adecuadas para nuestro caso, sin embargo, para nuestro planteamiento de la estabilización de suelos como técnica de mejoramiento de terreno, se acondicionó, desarrolló y se focalizó bajo las consideraciones del numeral 3.8.1.5) de la presente, ya que nos sirvió de asidero en la propuesta definitiva de esta técnica, el cual, fue alegado y acondicionado bajo los criterios de (Documento Básico SE-C Seguridad Estructural: Cimientos, 2019) y (Maza Palop, 2020) para justificarlo; pues, en función a factores delimitantes, que se describen a continuación en orden de prelación, propias de la investigación se tuvo en cuenta las siguientes condicionantes:

1. Tipo de problema: Está dado por un terreno estratigráfico de distribución aleatoria y errática a nivel superficial de diferentes suelos granulares y arcillosos con nivel freático a una profundidad de 7 a 6 metros.
2. Tipo y tamaño de estructura: Es un tanque metálico cilíndrico grande.
3. Tipo de suelo: está dado por la variedad de suelos granulares y arcillosos.
4. Tiempo y costo: No se evaluó por no estar dentro de nuestros objetivos.
5. Equipos e insumos: Se limitaron según la disponibilidad de éstos dentro de la región para la aplicación de alguna técnica en particular.

De las condicionantes mencionadas, se descartaron y se acogieron algunas de las técnicas de mejora de suelos bajo los siguientes enunciados:

- De acuerdo al problema de la condición natural del terreno, no es posible aplicar las siguientes técnicas, como la vibrocompactación, compactación dinámica profunda, voladuras, inyección de cemento, drenajes verticales prefabricados, mechas de

drenaje, lechada de chorro, inyecciones químicas, precarga y la estabilización de forma parcial.

- Por el tipo de estructura, se acogió aplicar las técnicas de estabilización por sustitución, compactación de material blando con pilotes cortos, precarga, desagües de tiras de arena, inyección de lechada de cemento, estabilización química, vibrocompactación, vibroreemplazo (columnas de grava) o compactación dinámica profunda: sin embargo, de las recomendadas, casi todas fueron descartadas por la condición estratigráfica errática y aleatoria del terreno, y quedando como apropiadas sólo a la estabilización por sustitución, la compactación con pilares cortos y vibroreemplazo (columnas de grava).
- Por el tipo de suelo, es incierta la aplicación directa de algún método, dado que el suelo presenta variedad muy heterogénea tanto superficial como vertical; por lo tanto, se rescata la técnica de estabilización por sustitución de material.
- Por la disponibilidad de equipos e insumos, se descartan las técnicas de compactación con pilares cortos y el vibroreemplazo (columnas de grava) por la escasa existencia de estos equipos para su ejecución.

De lo anterior, bajo este criterio de orden de prelación de factores condicionantes establecidos, se filtraron las posibles técnicas de mejora de suelos aplicables a nuestro caso, y se decantó la estabilización de suelos de forma parcial, dado que no todos los métodos específicos de esta técnica son aplicables en su condición natural del terreno. Por lo tanto, se planteó evaluar este método en nuestro estudio experimental.

3.8.2.2 Planteamiento de los métodos de estabilización de suelo

La estabilización de suelos presenta variedad de métodos y tipos de suelos asociados o no a un tipo de agente estabilizante, y según (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014), describe métodos particulares usualmente utilizados en carreteras como la estabilización mecánica por compactación, estabilización por combinación de suelos, estabilización por sustitución de suelos, estabilización con geosintéticos y estabilización química con agentes estabilizantes (cal, cemento, escoria, cloruro de sodio, cloruro de calcio, cloruro de magnesio, productos asfálticos); de los cuales, para nuestro planteamiento, se tuvo en cuenta las consideraciones de los numerales 3.8.1.6), 3.8.1.7) y 3.8.1.8), que se usaron como asidero para la propuesta definitiva de los métodos de estabilización a utilizar; en la que prevaleció con mayor valoración para los intereses de la investigación, la naturaleza del tipo de estructura del tanque; pues, éstos, cuentan con dos recomendaciones extraídas de la norma API 650, que conforman procedimientos propios de la estabilización de suelos para el diseño del mejoramiento

de terreno, y que también son muy utilizados en estructuras de carreteras. Dichas recomendaciones, según (American Petroleum Institute, 2012), son las siguientes:

- a. Retirar el material objetable y reemplazarlo con material compactado adecuado.
- b. Estabilización del material blando por métodos químicos o inyección de lechada de cemento.

Y a partir de éstas dos recomendaciones de la norma, se desprendió e identificó las características de correspondencia de cada una de ellas, tipificándolas en dos categorías de estabilización de suelos, tal cual (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015) lo clasifica en la estabilización mecánica y estabilización química, respectivamente. Por lo tanto, se planteó hacer la evaluación de estos dos métodos.

3.8.2.3 Planteamiento de los tipos de suelos

El tipo de suelo con o sin agente estabilizante asociado a un método de estabilización es un factor importante dentro de la estabilización de suelos, y presenta una múltiple variedad de éstos, y, por ello, se tomó como asidero principal el sistema de clasificación SUCS para nuestro estudio; pues ésta contiene una tipificación muy usada en la ingeniería, que agrupa de acuerdo a sus propiedades desde los más generales hasta lo más específico de los suelos. Para nuestro planteamiento, se tuvo en cuenta las consideraciones del numeral 3.8.1.6) y 3.8.1.7), y se usaron como base y justificación para la propuesta definitiva de los tipos de suelos a utilizar como material de los métodos de estabilización propuestos en el presente estudio, y, de ello, se acogió preponderantemente los materiales considerados en la estabilización de suelos por la norma API 650; por lo tanto, se planteó el uso del material propio del lugar (blando) y material granular seleccionado de préstamo, y son:

a.1). – Material propio del lugar (blando): El suelo en su condición natural, es muy heterogéneo con estratigrafía de disposición errática y aleatoria para su uso; sin embargo, considerando la filosofía de los métodos en carreteras no pavimentadas (afirmado), se planteó parcialmente el método de combinación de suelos; y, por cuestiones académicas de investigación experimental, se consideró, homogenizarlo a través del diseño de tratamiento de suelo equivalente, y viene a ser mezcla proporcional de suelos de calicatas (C-03, C-04, C-06 y C-07), ubicadas dentro del área de influencia del tanque residual proyectado, el cual, de dicha mezcla, resultó el tipo de suelo de grano fino CL (ver propiedades en las conclusiones del numeral 3.8.1.6), del cual, éste sirvió para evaluarlo con los métodos de estabilización propuestos.

a.2). – Material granular seleccionado de préstamo: Este tipo de suelos fue adquirido de la cantera Gloria (por las consideraciones del numeral 3.8.1.10); pues ésta cuenta con estándares de calidad para distintos usos, cantidad y potencia, y, del cual, se obtuvo finalmente un material de base de suelo granular grueso GM. Por lo tanto, se planteó utilizar este suelo para evaluar los métodos de estabilización propuestos, dado que, bajo la consideración de la filosofía de los métodos en carreteras no pavimentadas (afirmado), es factible para el uso en la estabilización mecánica y química; además, es respaldada por la norma API 650, informe geotécnico de la UNALM de la zona de estudio y otras experiencias.

3.8.2.4 Planteamiento del tipo de agente estabilizante

Este insumo cumple un rol importante en el método de la estabilización química asociada a un determinado tipo de suelo (suelo de grano fino o suelo granular grueso), y existen diversos tipos, desde los más tradicionales hasta los más innovadores, como:

- Agentes químicos como estabilizadores tradicionales disponibles en el mercado local, como la cal, cemento Portland, productos asfálticos, sales, etc.
- Productos químicos comerciales no tradicionales, patentizados y exclusivos para su uso, como ácidos orgánicos e inorgánicos, resinas y polímeros sintéticos u orgánicos, denominados aditivos químicos estabilizadores de suelos.

Para nuestro planteamiento se tomaron en cuenta las consideraciones de los numerales 3.8.1.8 y 3.8.1.9, pues se usaron como asidero principal en la propuesta definitiva del tipo de agente a utilizar en la evaluación de los métodos de estabilización para los tipos de suelos propuestos, y del que se desprendió, que la elección depende de la correspondencia con suelos de grano fino (CL) y suelo granular grueso (GM) propuesto; sin embargo, se concluyó que no existe un producto químico prototipo ideal para toda clase de suelos; es decir, para su uso, es recomendable verificar su eficiencia y especificaciones técnicas, aunque, para nuestro estudio, sólo se rigió por las especificaciones técnicas y antecedentes favorables en su uso para este tipo de suelos.

Por lo tanto, se recomendó evaluar el aditivo estabilizador enzimático orgánico, porque reportó experiencias favorables de incremento de índices CBR y principalmente con suelos arcillosos y granulares (CL, GM y GC); y, puntualmente, se eligió el Terrazyme por su certificación ISO 9002 y especificaciones técnicas (véase anexo de E.T.) y complementariamente por las siguientes condicionantes: adaptabilidad relativa en distintos tipos de suelos y disponibilidad en el mercado local.

- **Descripción de Terrazyme**

(Stasoil S.A.C., 2003), afirma que es un aditivo, producto del proceso metabólico microbial, incluyendo enzimas, que resulta del extracto de plantas naturales bajo un proceso de fermentación, y que actúa como un catalizador eficaz, que agiliza y fortalece la cohesión del suelo, creando una mejora más densa y estable, cuya resistencia a la compresión incrementa con el tiempo.

- **Características:**

- ✓ Alto rendimiento y bajo costo, que utiliza equipo normal.
- ✓ Aplicable aún en suelos de muy baja calidad.
- ✓ Es 100 % natural y ecológico, no tóxico y biodegradable.
- ✓ Compatible con el medio ambiente, de manejo seguro y no inflamable.

- **Áreas de aplicación:**

- ✓ En la construcción, rehabilitación y reparación de carreteras, caminos de tierra y baches, caminos secundarios, rellenos, áreas de control de erosión y otros.
- ✓ Tratamiento de sub rasante, base y sub base antes de caminos primarios, áreas de estacionamiento y pistas de aeropuertos.
- ✓ Lugares de ambiente ecológico sensibles, plantaciones, parques, senderos, etc.
- ✓ Estabilizador contra erosión y escurrimiento de bermas de caminos, canales y acequias.
- ✓ Sellador de fondos de lagunas, tanques y rellenos sanitarios.

- **Dosificación**

(Stasoil S.A.C., 2003), el aditivo tiene mejor desempeño si está dentro de los rangos de distribución granulométrica e índice de plasticidad; sin embargo, nuestros suelos predefinidos de suelo de grano fino CL y suelo granular grueso GM no son los ideales a estas exigencias, por lo que se utilizó la recomendación de uso en suelos no ideales de 1 L de TerraZyme por 25 m³ de material.

3.8.2.5 Planteamiento de variantes de mejora de suelos

De la técnica del tratamiento planteado, estabilización de suelos, con sus respectivas variantes de factores principales como el método de estabilización (mecánico o químico), tipo de suelos (suelos de grano fino o suelo granular grueso) asociado con o sin un tipo de agente estabilizante (aditivo enzimático – Terrazyme) respaldado por la norma API 650; se tiene que, surge la necesidad de evaluar dichas variantes, a través, de la combinación de cada factor con sus respectivas categorías (niveles de variantes de cada factor), y, a partir de ello, se planteó cuatro (04) tratamientos de suelos con esta técnica, y que se identifican y tipifican éstos, particularmente según la naturaleza del material utilizado y métodos específicos de la

estabilización de suelos según (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014), como se describe e ilustra cada uno de ellos en la tabla adjunta.

Tabla 15: Variantes de categorías de métodos de estabilización de suelos y tipos de suelos según naturaleza de material y métodos específicos del manual del MTC

Ítem	Tratamiento de mejora de terreno	Naturaleza	Método específico
1.0	Estabilización mecánica con suelo de grano fino (CL)	Mezclado propio del lugar.	Por combinación de suelos (parcialmente).
2.0	Estabilización mecánica con suelo granular grueso (GM)	Seleccionado de préstamo de cantera	Por sustitución
3.0	Estabilización química con aditivo enzimático y suelo de grano fino (CL)	Mezclado propio del lugar.	Por aditivo estabilizador
4.0	Estabilización química con aditivo enzimático y suelo granular grueso (GM)	Seleccionado de préstamo de cantera	Por aditivo estabilizador

Por lo tanto, se planteó evaluar estos cuatro tratamientos con la finalidad de desarrollar un método de estabilización con o sin aditivo y tipo de suelo propicio para determinar efectos significativos en la resistencia al corte en el mejoramiento de terreno de cimentaciones superficiales de tanques.

3.8.3 Diseño de la Investigación

3.8.3.1 Objetivo de la investigación

Persigue determinar y analizar los efectos del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla - Lima; y para lograrlo, se manipuló y planteó la combinación de las diferentes categorías de los factores de los métodos de estabilización de suelos y tipos de suelos de acuerdo a lo descrito en el numeral 3.8.2.5), y está dado por la siguiente relación de las variables y sus respectivas modalidades de clasificación como se ilustra en la tabla adjunta:

Tabla 16: Relación de las variables independientes y sus respectivas categorías

Ítem	Variable independiente (X_i)	Modalidad (categoría)	Clasificación según a:
01	Métodos de estabilización	Estabilización mecánica	Winterkorn (2005), citado en (Choque Sánchez, 2012, pág. 38) y (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015).
		Estabilización química	
02	Tipos de suelos	Suelo de grano fino CL	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS (Unified Soil Classification System (USCS)).
		Suelo granular grueso GM	

De los cuales, por ser experimental, conformaron dos grupos de la siguiente manera:

- Grupo de control (GC) : Terreno sin tratamiento de métodos de estabilización y tipos de suelo.
- Grupo experimental (GE) : Terreno con tratamiento de métodos de estabilización y tipos de suelos.

De este último; es decir, del grupo experimental, se representó la relación de causalidad de los tratamientos que resultan de la manipulación de los factores de la variable independiente a través de la combinación de sus diferentes categorías con sus efectos en la variable dependiente de la siguiente manera:

Tabla 17: Relación de grupos experimentales (GE) y sus efectos en la variable dependiente

Grupo de investigación	Causa (variable independiente) Modos de experimentos	Influye	Efecto (variable dependiente)	Nomenclatura
Grupo experimental	1. Terreno con tratamiento de método de estabilización mecánica y tipo de suelo de grano fino CL.	Incremento significativo	Mejoramiento de terreno a través de la resistencia al corte	GE - 01
	2. Terreno con tratamiento de método de estabilización mecánica y tipo de suelo granular grueso GM.	Incremento significativo	Mejoramiento de terreno a través de la resistencia al corte	GE – 02
	3. Terreno con tratamiento de método de estabilización química con aditivo enzimático y tipo de suelo de grano fino CL.	Incremento significativo	Mejoramiento de terreno a través de la resistencia al corte	GE – 03
	4. Terreno con tratamiento de método de estabilización química con aditivo enzimático y tipo de suelo granular grueso GM.	Incremento significativo	Mejoramiento de terreno a través de la resistencia al corte	GE – 04

3.8.3.2 Diseño del tratamiento experimental

Se rigió bajo un conglomerado de condiciones establecidas para el experimento, con el fin único de dar respuesta a la hipótesis de la investigación, y representa el eje de la misma (Kuehl, 2001, pág. 4).

En nuestro caso, de la hipótesis, se diseñó y desarrolló el arreglo factorial del tipo 2x2 (2^k); pues, se acotó convencionalmente la estabilización de suelos en dos factores

preponderantes con sus respectivos niveles (categorización y/o clasificación), como lo son: método de estabilización (mecánica y química) y tipo de suelos (suelo de grano fino CL y suelo granular grueso GM); y, se planteó este diseño de tratamiento experimental considerando estimar que el accionar de éstos dos influirían asociadamente o independientemente en el incremento de la resistencia al corte de la simulación del mejoramiento de terreno en los especímenes de prueba triaxial UU.

3.8.3.3 Diseño de arreglo factorial del tipo 2x2 (2^k)

Se desarrolló un arreglo combinatorio bifactorial con tratamiento simétrico del tipo cruzado, con el fin de estudiar los tratamientos generados de las combinaciones de los factores, efectos principales, efectos cruzados o de interacción de factores sobre las variables de respuesta de la resistencia al corte ($S_u = C_u$), y sus respectivos parámetros de resistencia (ϕ, C). La conformación de los factores y niveles está dada por:

a) Factores influyentes: Se consideró de acuerdo a la literatura y características intrínsecas de la misma, y viene conformado por dos factores cualitativos:

a.1). - Factor A: método de estabilización

a.2). - Factor B: tipo de suelo

b) Niveles de cada factor: Se definieron convencionalmente dos niveles (categorías y/o clasificación) por cada factor de la investigación, y están dados por:

b.1). – En factor A: La estabilización de suelos presenta diversos métodos; de los cuales, sólo se consideró según al numeral 3.8.2.2) del presente estudio, en dos categorías como se aprecia a continuación:

Tabla 18: Factor del método de estabilización con sus respectivas categorías

Método de estabilización	Categoría 01:	Mecánica
	Categoría 02:	Química

b.2). – En factor B: El tipo de suelo, también presenta gran variedad, pero se eligió convencionalmente según al numeral 3.8.2.3) dos clasificaciones, y se presenta de la siguiente manera:

Tabla 19: Factor de tipo de suelo con sus respectivos categorías

Tipo de suelo	Categoría 01:	Suelo de grano fino CL
	Categoría 02:	Suelo granular grueso GM

Los factores cualitativos no presentan niveles cuantitativos, sino se derivan en categorías y/o clasificaciones de los factores (Kuehl, 2001, pág. 21).

Por lo tanto, nuestro modelo matemático de diseño estadístico 2x2 está dado por:

$$y_{ijk} = \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \dots \dots \dots \text{ecuación (09)}$$

Donde:

y_{ijk} : valor observado en la variable de respuesta en el i-ésimo nivel del factor A y j-ésimo nivel del factor B en la repetición k-ésima.

μ : es la media general.

α_i : es el efecto debido al i-ésimo nivel del factor A.

β_j : es el efecto debido al j-ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\beta)_{ij}$: efecto de la interacción entre el i-ésimo nivel del factor A y el j-ésimo nivel del factor B.

ε_{ijk} : error aleatorio asociado a la ijk-ésima unidad experimental

Del que se plantean las siguientes hipótesis de prueba de significancia de los efectos de cada factor o la interacción de ellos sobre cada variable de respuesta:

1. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $\alpha_i = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $\alpha_i \neq 0$ (No hay efecto Vs hay efecto del factor A).
2. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $\beta_j = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $\beta_j \neq 0$ (No hay efecto Vs hay efecto del factor B).
3. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ (No hay efecto Vs hay efecto de interacción del factor A y B).

3.8.3.4 Diseño del experimento:

Se desarrollaron pruebas de simulación de la estabilización de suelos en especímenes de ensayos de compresión triaxial UU, de acuerdo a lo descrito en el literal b) del numeral 3.8.4.1), con dos réplicas para las cuatro combinaciones (04 tratamientos), con el fin de medir el mejoramiento de terreno a través de la resistencia al corte ($S_u = C_u$), y sus parámetros de resistencia de la cohesión “C” y ángulo de fricción “ ϕ ” en un diseño totalmente aleatorio. Los datos de la resistencia al corte y los parámetros de resistencia de los ocho (08) ensayos se presentan en una distribución tabular como se aprecia en la tabla adjunta para su respectivo procesamiento.

Tabla 20: Distribución de arreglo factorial de 2x2 para las variables de respuesta (S_u , C , ϕ)

		Factor A: Métodos de Estabilización			
		Mecánica (-)		Química (+)	
Factor B: Tipos de suelo	Suelo GM (+)	Réplica N° 01	Réplica N° 02	Réplica N° 01	Réplica N° 02
		$(S_u, C, \phi)_{ij}$	$(S_u, C, \phi)_{ij}$	$(S_u, C, \phi)_{ij}$	$(S_u, C, \phi)_{ij}$
	Suelo CL (-)	Réplica N° 01	Réplica N° 02	Réplica N° 01	Réplica N° 02
		$(S_u, C, \phi)_{ij}$	$(S_u, C, \phi)_{ij}$	$(S_u, C, \phi)_{ij}$	$(S_u, C, \phi)_{ij}$

3.8.4 Mecánica de Suelos

Los estudios abarcaron tres etapas bien definidas (preliminar, exploratoria y experimental), y se describe a nivel cronológico y tipológico a continuación:

3.8.4.1 Descripción tipológica

Los tipos de ensayos realizados fueron agrupados bajo la convención de estándares y especiales (véase el anexo de EMS), y se describe a continuación:

a) Ensayos de mecánica de suelos estándares

Se realizaron en las tres etapas y comprenden las siguientes:

a.1.- Análisis granulométrico - NTP 339.128 (ASTM D 422): Se realizó en las tres etapas para determinar la distribución granulométrica con el método mecánico con mallas de suelos granulares y finos para su respectiva clasificación

Figura 15: Ensayo granulométrico de suelo granular grueso GM



a.2.- Límites de consistencia - NTP 339.129 (ASTM D 4318): Se realizó en las tres etapas de la investigación, con el fin de identificación y clasificación del suelo; es decir, se determinó el límite líquido, límite plástico y su correspondiente determinación del índice de plasticidad, y a su vez se verificó la influencia del aditivo en el índice de plasticidad del grupo experimental.

Figura 16: Ensayo de límite líquido y límite plástico



a.3.- Humedad natural - NTP 339.127 (ASTM D 2216): Se realizó en las tres etapas de la investigación con el fin de determinar el contenido de agua en cada muestra de suelo, y que es una propiedad fundamental imprescindible.

a.4.- Densidad natural - NTP 339.143 (ASTM D 1556): Propiedad que determina la relación de la cantidad de masa por volumen in situ que se realizó en la etapa exploratoria.

Figura 17: Ensayo de densidad natural de campo en etapa exploratoria



a.5.- Densidad de campo por método del cono de arena - NTP 339.143 (ASTM D 3080): Se realizó en la etapa de exploración, para verificar la calicata del suelo crítico, y a su vez, esta propiedad nos sirvió para practicar la prueba de compresión triaxial UU con especímenes remoldados a la densidad de campo.

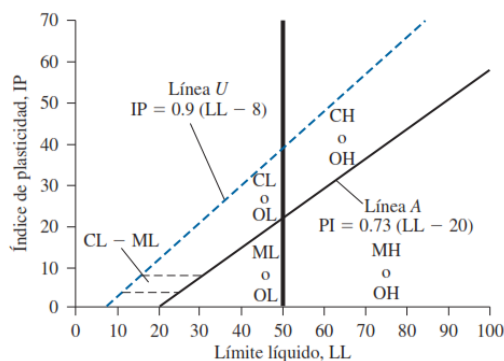
a.6.- Clasificación SUCS - NTP 339.134 (ASTM D 2485): Se realizó en las tres etapas de la investigación, utilizando la simbología y su convención para tipificarla con sus tablas de referencia, como se ilustra a continuación.

Tabla 21: Simbología de tipificación para clasificar los suelos según SUCS

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos orgánicos y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Fuente: (Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 2012, pág. 19)

Figura 18: Gráfica de plasticidad



Fuente: (Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 2012, pág. 20)

a.7.- Próctor modificado - NTP 339.141 (MTC E-115): Se realizó con el propósito de determinar el contenido de humedad óptima para alcanzar la densidad seca máxima y utilizarla con fines convenientes para la obtención de valores de resistencia al corte en su máxima densificación de cada uno de los suelos en las tres etapas de la investigación.

Figura 19: Ensayo Proctor modificado previo curado del suelo granular GM.



a.8.- Gravedad específica - NTP 339.131 (ASTM D 854): Se realizó con fines de caracterizar la densidad relativa del material de los suelos de grano en las tres etapas con finalidad de predecir el peso unitario del suelo.

Figura 20: Ensayos de gravedad específica para un suelo de grano fino CL



a.9.- Ensayo CBR - MTC E-132 (ASTM D 1883): Este ensayo se realizó, tanto, en la etapa exploratoria como en las experimentales, con fines complementarios para determinar los incrementos de la resistencia relativa de cada espécimen ensayado para una densidad seca máxima del 95% al 100%.

Se acudió a este ensayo, muy utilizado, para la comprobación indirecta y adicional de mejoría de la resistencia de los especímenes, a través, de los indicadores de calidad que éste nos proporciona, dado que no determina los parámetros de resistencia al corte; sin embargo, su uso es muy utilizado en la verificación de la calidad de los suelos.

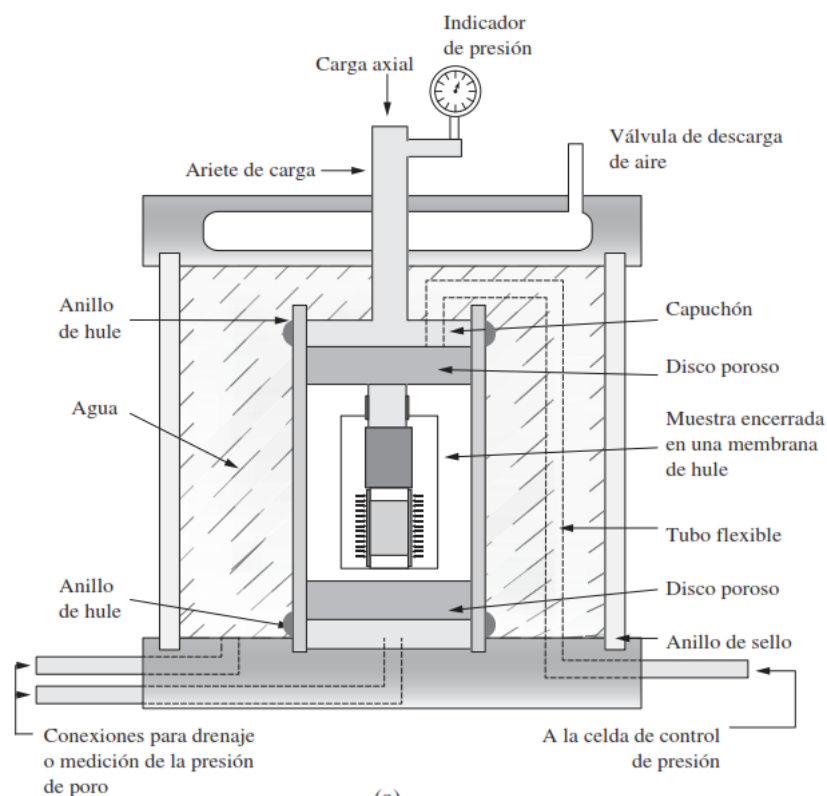
Figura 21: Ensayos CBR y saturación antes de ejecutar la prueba



b) Ensayos de mecánica de suelos especiales

Se realizó el ensayo de compresión triaxial UU para determinar la resistencia al corte ($S_u = C_u$), y sus parámetros de resistencia de la cohesión “C” y ángulo de fricción “ ϕ ” en un diseño totalmente aleatorio, cuyo equipo se ilustra en el diagrama:

Figura 22: Diagrama de prueba de ensayo triaxial



Fuente: (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015, pág. 240)

Ensayo de compresión triaxial (UU) no consolidado no drenado - NTP 339.164 (ASTM D 2850):

Se realizó en las etapas de exploración y experimental, así como se aprecia representativamente uno de los ensayos sobre suelo GM en las figuras adjuntas. Además, se eligió este tipo de ensayo bajo las siguientes consideraciones:

1. El tiempo y costo del ensayo triaxial UU, o de respuesta rápida, requiere menor tiempo en el desarrollo de la misma, y un costo menor con respecto al ensayo consolidado drenado (CD) y no consolidado no drenado (CU).
2. Por las características del terreno, el suelo no presenta un nivel freático muy cercano a la superficie; por ello, se consideró evaluar bajo condiciones no drenadas semejantes a la realidad de sitio.
3. Según las condiciones de servicio de la estructura, el tanque proyectado representa una acción rápida de desempeño inmediato del terreno; es decir, se requiere evaluar el terreno para un desempeño de respuesta rápida.
4. Según la condición crítica (Alva Hurtado, 2009), afirma que un terreno se encuentra en su condición más crítica de valores bajos de resistencia al corte, en condiciones de no consolidada – no drenada (UU), pues, a

diferencia de las otras dos condiciones de CD y CU, que representan valores superiores de resistencia al corte de los suelos, y, por ende se diseña usualmente en base a los valores de resistencia cortante no consolidada – no drenada (UU).

Figura 23: Ensayo de compresión triaxial UU para un suelo granular grueso GM.



Los ensayos tuvieron diferentes características según las etapas:

- **Prueba triaxial UU en etapa exploratoria:**

Se realizó a partir de probetas cilíndricas remoldeadas, con densidades de campo de la calicata C-04' para el estrato de suelo de grano fino CL de $h = 1.00$ m @ 1.50 m, y suelo de grano fino CH de $h = 1.50$ m @ 2.50 m de profundidad, con un tamaño de espécimen (diámetro $D_e = 2.83$ " y altura $H_e = 5.66$ ") para ambos estratos, de los cuales, el diámetro " D_e " cumple la condición de que la partícula de mayor tamaño dentro de la muestra del ensayo es menor a 1/10 de

su diámetro, y la altura " H_e " de la probeta cumple con una relación de diámetro - altura ($D_e: H_e$ de 1:2), con dos replicas para cada uno.

- **Prueba triaxial UU en etapa experimental:**

Del mismo modo, para los grupos experimentales GE-01 y GE-03 (suelo de grano fino CL y suelo de grano fino CL + aditivo) se utilizó las probetas cilíndricas remoldeadas con densidades secas máximas, obtenidas del ensayo Proctor modificado y en tamaño (diámetro $D_e = 2.83"$ y altura $H_e = 5.66"$) para ambos grupos, de los cuales, el diámetro " D_e " del espécimen cumple la condición de que la partícula de mayor tamaño dentro de la muestra del ensayo es menor a 1/10 del diámetro, y la altura " H_e " cumple con la relación de diámetro - altura ($D_e: H_e$ de 1:2) con dos replicas para cada uno; asimismo, para los grupos experimentales GE-02 y GE-04 (suelo granular grueso GM y suelo granular grueso GM + aditivo), se utilizó las probetas cilíndricas remoldeadas con densidades secas máximas, obtenidas del Proctor modificado y en tamaño (diámetro $D_e = 6"$ y altura $H_e = 12"$) para ambos grupos; de los cuales, como el diámetro $D_e > 2.8"$, entonces cumple con la condición de la relación del tamaño nominal máximo de partículas, que es menor a 1/6 del diámetro del espécimen, y la altura " H_e " cumple con la relación de diámetro - altura ($D_e: H_e$ de 1:2) con dos replicas para cada uno.

3.8.4.2 Descripción cronológica.

Los estudios de mecánica de suelos se realizaron en tres etapas, de las cuales se describe y detalla a continuación:

1. Ensayos de mecánica de suelos en etapa preliminar:

Corresponden a los ensayos estándares piloto del diseño preliminar, para determinar el uso de material natural homogenizado equivalente como material de sitio del terreno de fundación en la mejora de suelo, a través de la estabilización de suelos, y al que se le practicaron los siguientes ensayos:

Tabla 22: Relación de cantidad de ensayos en etapa preliminar

Ítem	Ensayo	Cantidad	Norma
01	Análisis granulométrico	01	NTP 339.128 (ASTM D 422)
02	Límites de consistencia	01	NTP 339.129 (ASTM D 4318)
03	Clasificación SUCS	01	NTP 339.134 (ASTM D 2485)
04	Próctor modificado	01	NTP 339.141 (MTC E-115)

2. Ensayos de mecánica de suelos en etapa exploratoria:

Comprendió la verificación in situ del suelo crítico del terreno de campo, calicata C – 04; el cual fue reasignado con una nueva denominación, calicata C -04', y se ubicó a través de los planos geotécnicos del informe del estudio (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017). Y todo esto, con el propósito de generar las mismas condiciones de medición en las propiedades de suelo sin tratamiento (grupo de control) y suelo con tratamiento (grupo experimental), y en el que se practicaron los siguientes ensayos:

Tabla 23: Relación de la cantidad y tipos de ensayos en etapa exploratoria

Ítem	Ensayo	Cantidad	Norma
01	Análisis granulométrico	02	NTP 339.128 (ASTM D 422)
02	Límites de consistencia	02	NTP 339.129 (ASTM D 4318)
03	Humedad Natural	02	NTP 339.127 (ASTM D 2216)
04	Densidad Natural	02	NTP 339.143 (ASTM D 1556)
05	Método del cono de Arena	02	NTP 339.143 (ASTM D 3080)
06	Clasificación SUCS	02	NTP 339.134 (ASTM D 2485)
07	Compresión Triaxial UU	02x(02 rep.)	NTP 339.164 (ASTM D 2850)
08	Próctor modificado	02	NTP 339.141 (MTC E-115)
09	Gravedad específica	02	NTP 339.131 (ASTM D 854)

Cabe señalar que, en la calicata C-04', se encontró el suelo de grano fino CL en el estrato $h = 1.00 @ 1.50$ m, y alcanzó sólo con la exploración de esta única calicata para obtener este tipo de suelo, y ser utilizado en los ensayos experimentales de estabilización química y mecánica, y así se limitó a verificar y extraer muestras de las calicatas C-07 y C-06 que poseen este tipo de suelos.

3. Ensayos de mecánica de suelos en etapa experimental:

Comprendieron ensayos sobre suelo de grano fino CL, suelo granular grueso GM, suelo de grano fino CL con aditivo, y suelo granular grueso GM con aditivo; es decir, los ensayos fueron aplicados a los cuatro tratamientos de estabilización mecánica y química respectivamente para la mejora de suelos (grupos experimentales); y dichos ensayos se describen en las tablas adjuntas:

Tabla 24: Relación de la cantidad y tipos de ensayos en etapa experimental

Ensayo	Número	Norma
Análisis granulométrico	04	NTP 339.128 (ASTM D 422)
Límites de consistencia	06	NTP 339.129 (ASTM D 4318)
Clasificación SUCS	04	NTP 339.134 (ASTM D 2485)
Compresión Triaxial UU	05x(02 replicas)	NTP 339.164 (ASTM D 2850)
Próctor modificado	05	NTP 339.141 (MTC E-115)
C.B.R.	04	MTC E-132 (ASTM D 1883)
Gravedad específica de Sólidos	03	NTP 339.131 (ASTM D 854)

3.8.4.3 Cálculo de materiales:

Se determinó la cantidad en cada etapa respectiva por cada EMS, utilizando un respaldo de un factor de seguridad de 3 en cada una de ellas. Y está dado por:

a) Cantidad de material en primera etapa de ensayo piloto:

Se calculó la cantidad requerida de material de suelo mezclado (suelo equivalente), en función de los ensayos practicados según el detalle adjunto:

Tabla 25: Cantidad de material requerido en ensayo piloto preliminar

Ensayos de Laboratorio de Suelos	Coef.	# veces	Und	Cantidad	Parcial	Total
Granulometria		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo del Limite Liquido y Limite Plástico		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo de Proctor Modificado		04	Kg	3.00	12.00	
Ensayo Triaxial	1	03	Kg	1.50	4.50	
Cantidad acumulada						17.50
Porcentaje de desperdicios (15.0 %)						2.63
Sub total						20.13
Factor de seguridad de contingencia						3.00
Cantidad total de material mezclado a utilizar (Kg)						60.38

De la tabla anterior, se tiene requerido un total de 60.38 Kg; de los cuales, se planteó la mezcla de 20 Kg para cada muestra de las calicatas C-03, C-04, C-06 y C-07 (muestras remanentes de estudio geotécnico), para obtener una cantidad acumulada requerida como se detalla en la siguiente tabla adjunta:

Tabla 26: Cantidad de suelo equivalente mezclado del área de influencia del tanque.

ítem	Nombre de calicata	Tipo de suelo	Estrato (h : metros)	Cantidad (Kg)	Total
01	Calicata C - 03	CH con arena	1.50 @ 2.50	20.00	
02	Calicata C - 04	CH	1.50 @ 2.50	20.00	
03	Calicata C - 06	CL arenoso	1.50 @ 2.50	20.00	
04	Calicata C - 07	CL arenoso	1.50 @ 2.50	20.00	
Cantidad total de suelo mezclado (Kg)					80.00

Por lo tanto, de lo anterior, se tiene que la demanda de la cantidad requerida y la cantidad disponible está cubierta en un 31.75 % de exceso.

b) Cantidad de materiales en etapa exploratoria:

Se referenció el cálculo para el suelo crítico de calicata C-04' en sus dos estratos predefinidos, y se tienen calculadas las siguientes cantidades.

- En estrato h = 1.00 @ 1.50 m, se tiene calculado un aproximado de 77.45 kg de material de suelo de grano fino CL según la tabla adjunta:

Tabla 27: Cantidad de suelo en estrato superior h = 1.00 @ 1.50 m en calicata C-04'

Ensayos de Laboratorio de Suelos	Coef.	# veces	Und	Cantidad	Parcial	Total
Granulometria		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo del Limite Liquido y Limite Plástico		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo de gravedad específica		03	Kg	0.15	0.45	
Ensayo de Proctor Modificado		04	Kg	3.00	12.00	
Ensayo Triaxial	2	03	Kg	1.50	9.00	
Cantidad acumulada						22.45
Porcentaje de desperdicios (15.0 %)						3.37
Sub total						25.82
Factor de seguridad de contingencia						3.00
Cantidad total en estrato h = 1.50 (Kg)						77.45

- En estrato h = 1.50 @ 2.50 m se tiene calculado un aproximado de 77.45 kg de material de suelo de grano fino CH, según la tabla adjunta:

Tabla 28: Cantidad de suelo en estrato superior h = 1.50 @ 2.50 m en calicata C-04'

Ensayos de Laboratorio de Suelos	Coef.	# veces	Und	Cantidad	Parcial	Total
Granulometria		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo del Limite Liquido y Limite Plástico		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo de gravedad específica		03	Kg	0.15	0.45	
Ensayo de Proctor Modificado		04	Kg	3.00	12.00	
Ensayo Triaxial	2	03	Kg	1.50	9.00	
Cantidad acumulada						22.45
Porcentaje de desperdicios (15.0 %)						3.37
Sub total						25.82
Factor de seguridad de contingencia						3.00
Cantidad total en estrato h = 2.50 (Kg)						77.45

- c) Cantidad de materiales en etapa experimental:

Se calcularon los dos materiales de suelo del tipo de grano fino CL y suelo granular grueso GM para cada grupo experimental de la siguiente manera:

- En ensayos experimentales de laboratorio de tratamiento de estabilización mecánica sobre suelo de grano fino CL, se tiene calculado un aproximado de 138 kg del material, según la tabla adjunta:

Tabla 29: Cantidad de material de suelo CL en tratamiento de estabilización mecánica

Ensayos de Laboratorio de Suelos	Coef.	Und	Und	Cantidad	Parcial	Total
Ensayo de Granulometría		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo del Limite Liquido y Limite Plástico		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo de Proctor Modificado		04	Kg	3.00	12.00	
Ensayo de C.B.R		03	Kg	6.00	18.00	
Ensayo Triaxial	2	03	Kg	1.50	9.00	
Cantidad acumulada						40.00
Porcentaje de desperdicios (15.0 %)						6.00
Sub total						46.00
Factor de seguridad de contingencia						3.00
Cantidad total de suelo CL (Kg)						138.00

- En ensayos experimentales de laboratorio de tratamiento de estabilización química sobre suelo de grano fino CL, se tiene calculado un aproximado de 136.28 kg del material, según la tabla adjunta:

Tabla 30: Cantidad de material de suelo CL en tratamiento de estabilización química

Ensayos de Laboratorio de Suelos	Coef.	Und	Und	Cantidad	Parcial	Total
Ensayo del Limite Liquido y Limite Plástico		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo de Proctor Modificado		04	Kg	3.00	12.00	
Ensayo de C.B.R		03	Kg	6.00	18.00	
Ensayo Triaxial	2	03	Kg	1.50	9.00	
Cantidad acumulada						39.50
Porcentaje de desperdicios (15.0 %)						5.93
Sub total						45.43
Factor de seguridad de contingencia						3.00
Cantidad total (Kg)						136.28

- En ensayos experimentales de laboratorio de tratamiento de estabilización mecánica sobre suelo granular grueso GM, se tiene calculado un aproximado de 476 kg del material, según la tabla adjunta:

Tabla 31: Cantidad de material de suelo GM en tratamiento de estabilización mecánica

Ensayos de Laboratorio de Suelos	Coef.	Und	Und	Cantidad	Parcial	Total
Granulometría		01	Kg	14.50	14.50	
Ensayo del Limite Liquido y Limite Plástico		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo de Proctor Modificado		04	Kg	6.00	24.00	
Ensayo de C.B.R		03	Kg	6.00	18.00	
Ensayo Triaxial	2	03	Kg	13.50	81.00	
Cantidad acumulada						138.00
Porcentaje de desperdicios (15.0 %)						20.70
Sub total						158.70
Factor de seguridad de contingencia						3.00
Cantidad total (Kg)						476.10

- En ensayos experimentales de laboratorio de tratamiento de estabilización química sobre suelo granular GM, se tiene calculado un aproximado de 426.08 kg del material, según la tabla adjunta:

Tabla 32: Cantidad de material de suelo GM en tratamiento de estabilización química

Ensayos de Laboratorio de Suelos	Coef.	Und	Und	Cantidad	Parcial	Total
Ensayo del Limite Liquido y Limite Plástico		01	Kg	0.50	0.50	
Ensayo de Proctor Modificado		04	Kg	6.00	24.00	
Ensayo de C.B.R		03	Kg	6.00	18.00	
Ensayo Triaxial	2	03	Kg	13.50	81.00	
Cantidad acumulada						123.50
Porcentaje de desperdicios (15.0 %)						18.53
Sub total						142.03
Factor de seguridad de contingencia						3.00
Cantidad total (Kg)						426.08

3.8.4.4 Cantidad de insumos:

La cantidad del aditivo Terrazyme se calculó en función de la dosificación recomendada, densidad del material tratado y de acuerdo a la cantidad de material a estabilizar químicamente en los ensayos de laboratorio, y está dado por las siguientes consideraciones y procedimientos:

- 1.- Rendimiento y dosificación utilizada.

- Las especificaciones técnicas recomiendan 1 litro de TerraZyme por 33 m³.
- El rango de dilución en agua depende del tipo y estado del suelo, y se tiene:
 En suelos Secos1/2000
 En suelos Húmedos1/500

Sin embargo, los suelos determinados en la evaluación preliminar son ideales parcialmente; por lo tanto, se utilizó la dosificación recomendada para este tipo de caso, que es de 1 litro de TerraZyme por 25 m³ de material.

2.- Densidad de material estabilizado considerado.

Los tratamientos de estabilización química se realizaron sobre densidades secas máximas, los cuales, según estudio geotécnico de la UNALM, están dados en la tabla adjunta:

Tabla 33: Densidad máxima seca de suelos en estudio

Ítem	Tipo de suelo	Und.	Densidad máxima seca
01	Suelo natural tipo CL	gr/cm ³	1.85
02	Suelo seleccionado tipo GM	gr/cm ³	2.39

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

3.- Masa total acumulado de materiales.

La masa total de los dos materiales utilizados con aditivo en ensayos es:

$$\text{Masa total de suelo de grano fino CL} = 274.28 \text{ Kg}$$

$$\text{Masa total de suelo granular grueso GM} = 902.18 \text{ Kg}$$

4.- Volumen total acumulado de materiales.

Con las densidades y las masas totales de cada material, se obtuvo el volumen acumulado de cada uno de ellos. Así se tiene que:

$$\text{MDS (CL)} = 1,850.00 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{MDS (GM)} = 2,390.00 \text{ kg/m}^3$$

Entonces,

$$\text{Volumen de cantidad de suelo de grano fino CL} = 0.15 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de cantidad de suelo granular grueso GM} = 0.38 \text{ m}^3$$

5.- Volumen de insumo calculado

Dentro del planteamiento, se consideró utilizar la misma dosificación para ambos materiales, por lo que el volumen total acumulado de ambos materiales es:

$$\text{Volumen total} = 0.53 \text{ m}^3$$

Y, con la dosificación de 1 litro (L) de TerraZyme por 25 m³ de material, se tiene:

$$1 \text{ L de aditivo rinde } \frac{\quad}{25 \text{ m}^3 \text{ de material}}$$

$$X \frac{\quad}{0.53 \text{ m}^3 \text{ de material}}$$

Entonces, la cantidad requerida aproximada es:

$$X = 0.02 \text{ L}$$

Aplicando un factor de seguridad de 3.0, se tiene: $X = 0.06 \text{ L}$

Por lo tanto, el volumen de insumo calculado es de 60 ml.

3.8.4.5 Extracción y adquisición

Para los materiales de suelos e insumos, se realizó en la cantidad determinada para las tres etapas definidas, y de acuerdo a ello, se tienen los siguientes procedimientos:

- a) Extracción de material de suelo en etapa preliminar.

No fue necesario, pues, se utilizó los remanentes de las muestras de las calicatas (C-07, C-03, C-04 y C-06), del estudio geotécnico del proyecto: “Construcción de nuevas esferas de GLP y almacenamiento de turbo y residual de propiedad de Refinería la Pampilla – Ventanilla, Callao”.

- b) Extracción del material de suelo natural de grano fino, CL y CH

Se obtuvo de la calicata de sitio C-04 (renombrada calicata C-04') del suelo crítico de grano fino CH (estrato $h = 1.50 @ 2.50 \text{ m}$), y, a su vez, se encontró y extrajo suelo de grano fino CL (estrato $h = 1.00 @ 1.50 \text{ m}$) y no fue necesario extraer este tipo de suelo de las calicatas C – 06 y C -07 que poseen este material en sus estratos inferiores de $h = 2.50 \text{ m}$ de profundidad.

Figura 24: Calicata C-04' ubicada en área de influencia del tanque proyectado



- c) Adquisición de material seleccionado de suelo granular grueso GM.

Se adquirió mediante donación de la cantera Gloria, en una cantidad de 1.15 m^3 de volumen en demasía a lo calculado, como se aprecia en la vista fotográfica.

Figura 25: Adquisición de material de suelo granular de la cantera Gloria.



- d) Adquisición del insumo del aditivo estabilizador.

El aditivo Terrazyme fue donado por el distribuidor Stasoil S.A.C en una cantidad de 400 ml y que cubre en exceso la demanda requerida de 60 ml del insumo en la investigación, ya que el producto, sólo, viene en bidones de 20 L.

3.8.4.6 Habilitación y preparación de materiales

Los materiales se habilitaron y prepararon con el fin de ser utilizados sistemáticamente bajo las mismas condiciones en distintos tiempos, y comprendió los siguientes procedimientos:

- a) La cantidad de material de suelo de grano fino CL y CH a utilizar en cada ensayo proyectado fue secado en condiciones naturales de radiación solar y desmenuzado manualmente como se aprecia en las figuras adjuntas.

Figura 26: Desmenuzado y secado del suelo de grano fino CL.



- b) La cantidad de material de suelo granular grueso GM a utilizar en cada ensayo proyectado fue secado en condiciones naturales de radiación solar.

Figura 27: Almacenamiento de material granular restante y seco.



- c) A todos los materiales de suelos se le generaron condiciones de porcentaje de humedad estable y salvaguardo, a través de un secado uniforme y lento en horno a una temperatura ($T^\circ = 30^\circ \text{C}$), y su respectivo almacenamiento en bolsas herméticas de polietileno transparente para su uso en distintos tiempos.

Figura 28: Secado en horno ($T = 30^\circ \text{C}$) y almacén de suelo de grano fino CL en bolsa hermética.



3.8.4.7 Habilitación y preparación de equipos y herramientas

El laboratorio cuenta con equipos y herramientas de EMS. Sin embargo, se adquirió y habilitó herramientas de trabajo como: equipo de protección personal, balde milimetrado, jeringa milimetrada, sacos de polietileno, bolsas de polietileno herméticas de diferentes tamaños y fabricación de molde de acero metálico para el ensayo triaxial de tamaño especial para practicar sobre suelo granular.

3.8.5 Capacidad Portante

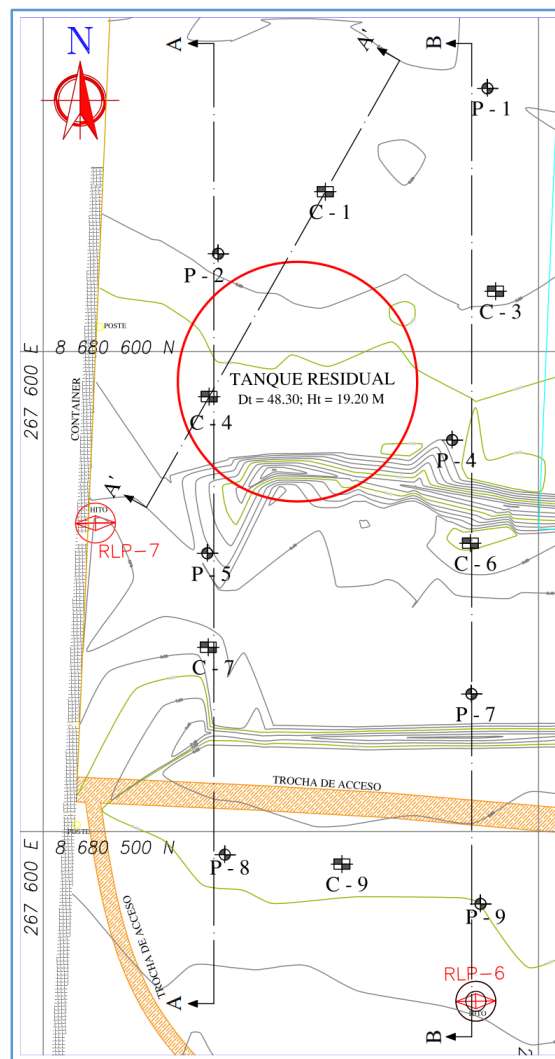
Se determinó según las propiedades geotécnicas del suelo, tipo y geometría de cimentación, factor de seguridad y otras consideraciones de casuísticas particulares de las condiciones de la forma y estratigrafía del terreno en el diseño.

3.8.5.1 Características del terreno

En nuestro estudio, se focalizó el análisis de las características geotécnicas del terreno para nuestra estructura de interés del tanque residual proyectado, y al respecto, se tienen las siguientes apreciaciones:

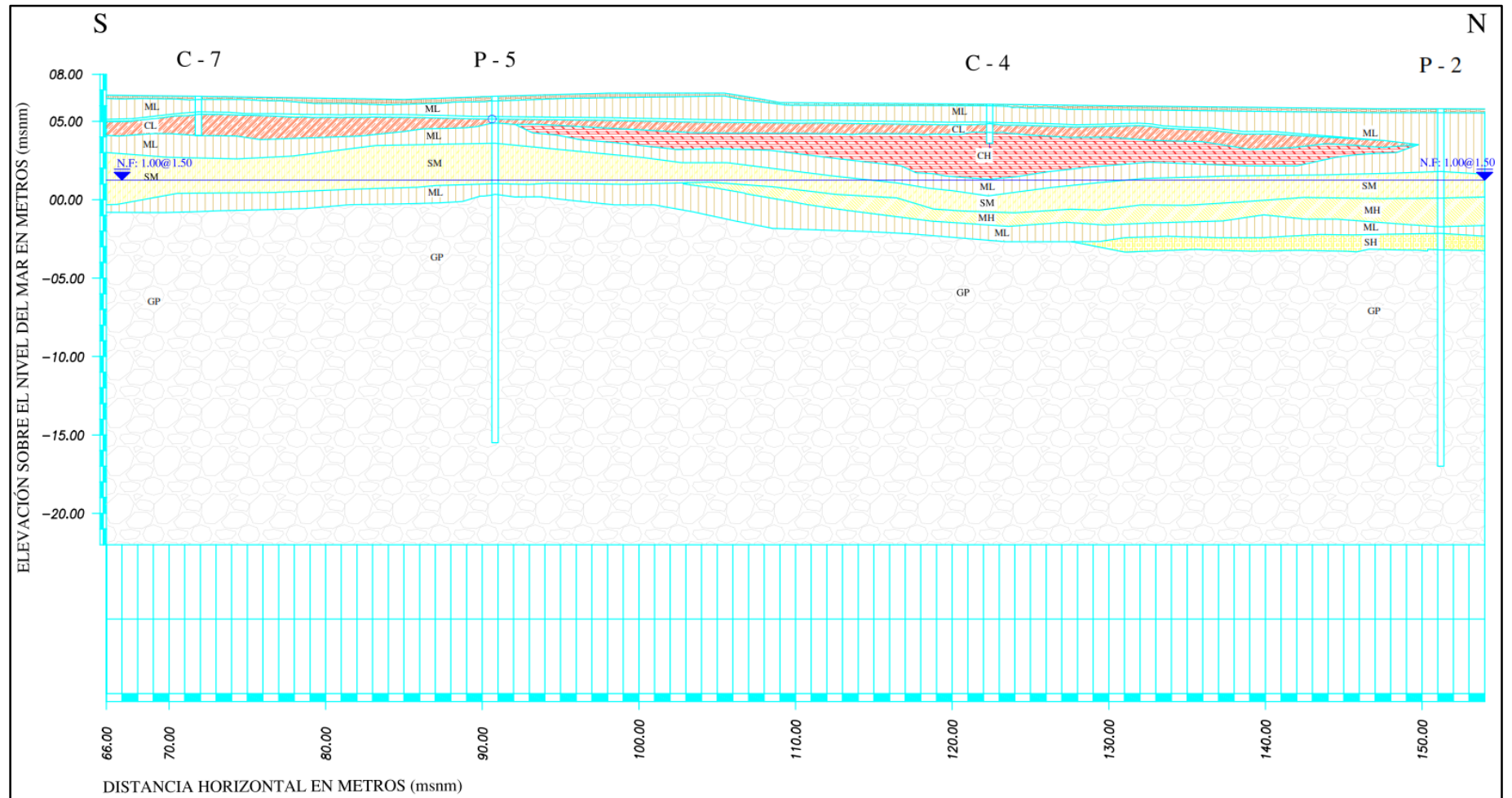
- La disposición de los tipos de suelos encontrados en las calicatas y perforaciones exploradas es de forma aleatoria y errática, a nivel superficial como estratigráfico, en el área de influencia de la estructura proyectada (véase anexo del plano geotécnico y perfil estratigráfico de la superficie en estudio).
- El terreno del área de estudio presenta un perfil estratigráfico heterogéneo; es decir, no homogéneo, tal cual se observa en las ilustraciones siguientes de planta y perfil estratigráfico focalizado.
- Presenta nivel freático en cota de 1.00 m @ 1.50 m.

Figura 29: Vista en planta del área de influencia del tanque residual.



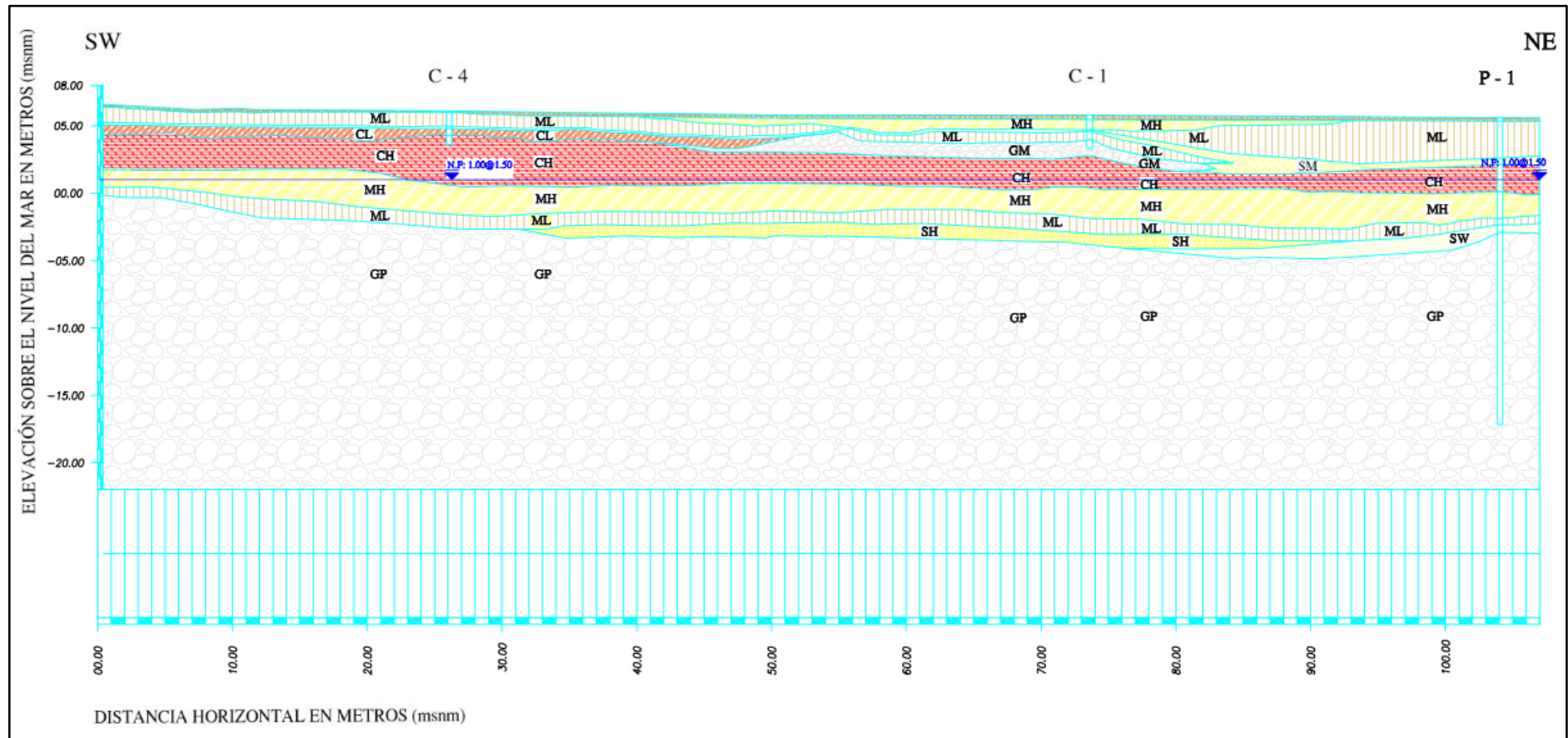
Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

Figura 30: Perfil estratigráfico geotécnico del corte A-A focalizado en el área de influencia del tanque residual



Fuente: propia

Figura 31: Perfil estratigráfico geotécnico de corte A'- A' del área de influencia de tanque residual.



Fuente: propia

3.8.5.2 Casuística en suelos no homogéneos y/o estratificados

Para nuestro caso, se referenció y evaluó dos criterios de métodos para suelos no homogéneos y/o estratificados para determinar la capacidad de carga última, y que se acondicionan a nuestro caso particular de suelo estratificado con su respectivo mejoramiento, y se describen cada uno de ellos a continuación:

A. Método de ponderación de parámetros de resistencia

Este método consiste en encontrar un suelo homogéneo equivalente, a través del promedio ponderado de los parámetros de resistencia de la cohesión y el ángulo de fricción interna de los suelos estratificados hasta una profundidad de la cuña de falla activa, y de esta manera, efectuar la solución aplicando los métodos convencionales conocidos (Bowles J. E., 1997, pág. 254).

$$C_{promedio} = \frac{C_1H_1 + C_2H_2 + C_3H_3 + \dots + C_nH_n}{\sum H_i} \dots \dots \dots (10)$$

$$\phi_{promedio} = \tan^{-1} \frac{H_1 \tan \phi_1 + H_2 \tan \phi_2 + \dots + H_n \tan \phi_n}{\sum H_i} \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

C_i = cohesión en estrato de espesor H_i ; c puede ser 0

ϕ_i = ángulo de fricción interna en estrato de espesor H_i ; ϕ puede ser cero.

H_i : multiplicar por un factor de ponderación (en éstas ecuaciones el valor es 1.0)

La profundidad de los estratos equivalentes de los parámetros promediados, van desde: $Z_1 = D_f$ @ hasta la profundidad de $Z_2 = D_f + 0.5B \tan^2(45^\circ + \phi/2)$, en ésta última, se encuentra la cuña de falla activa.

Se pueden requerir una o dos iteraciones para obtener los mejores valores promedio de ϕ - C , ya que B no suele ser fijo hasta que se establezca la capacidad de carga. Y, a partir de estos parámetros de resistencia promedio, se utilizan en la ecuación convencional para un suelo homogéneo y se calcula la capacidad portante última.

Cabe señalar que este método alternativo de cálculo de la capacidad de carga en un suelo estratificado es aplicable sólo para estratos delgados o de poco espesor, y particularmente para nuestro caso, es posible su aplicación de forma parcial. Por lo tanto, no se llegó a utilizar esta metodología.

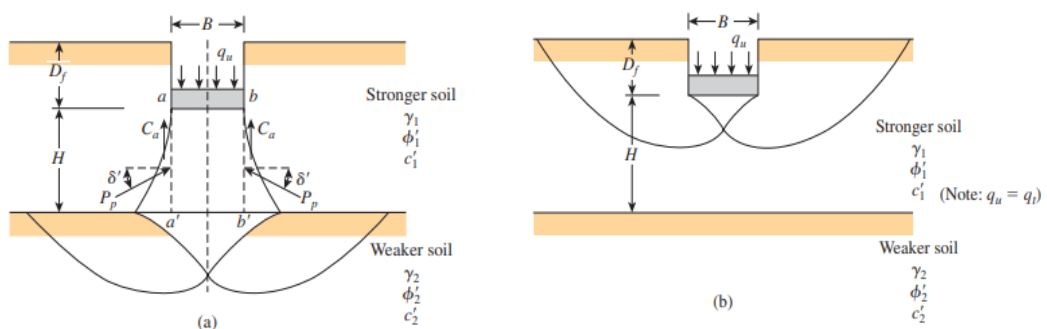
B. Método casuístico por resistencia de suelos estratificados

Existen varios métodos específicos casuísticos, que estandarizan procedimientos para estimar la capacidad portante. En nuestro estudio, se identificó y adecuó para el típico caso de: “capacidad de carga en capas de suelo más fuerte sobre suelo más débil”; por lo que, en la simulación de un modelo de mejoramiento de terreno de cimentación superficial a través de la estabilización de suelos, se asume equivalentemente para la aplicación de este método como:

- Suelo de estrato superior más fuerte: Suelo mejorado por estabilización
- Suelo de estrato inferior más débil: Suelo crítico “CH” en calicata C-04’

Este método específico fue propuesto por Meyerhof y Hanna (1978) y Meyerhof (1974), y presenta dos casos, como se ilustra en la figura adjunta:

Figura 32: Capacidad portante de una cimentación continua sobre suelo estratificado de suelo más fuerte sobre débil: (a) H pequeña; y (b) H grande.



Fuente: (Das & Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 2019, pág. 269)

De la ilustración anterior, se tiene que:

B = Ancho de la cimentación

C_a = Fuerza de cohesión

P_p = Fuerza pasiva por unidad de longitud de las caras aa' y bb'

q_b = Capacidad de carga última de estrato inferior débil (q_2)

q_t = Capacidad de carga última de estrato superior fuerte (q_1)

δ' = Inclinación de la fuerza pasiva P_p con el horizontal

D_f = Profundidad de la cimentación o altura de desplante

q_u = Capacidad de carga última

H = Profundidad desde el desplante de la cimentación hasta el estrato débil

Cuyos parámetros físicos para ambas capas están dados por:

Tabla 34: Parámetros físicos de suelo fuerte y débil, según la ilustración

Propiedades de suelos			
Capas	Peso unitario	Ángulo de fricción	Cohesión
Parte superior	γ_1	ϕ'_1	c'_1
Parte inferior	γ_2	ϕ'_2	c'_2

Esta casuística típica, de estrato superior de suelo más fuerte, debe cumplir el siguiente requisito de relación de capacidad de carga de estrato débil y fuerte:

$$\frac{q_2}{q_1} < 1 \dots \dots \dots (12)$$

Donde, la capacidad de carga última de cada estrato está dada por:

$$q_1 = c'_1 N_{c(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma(1)} \dots \dots \dots (13)$$

$$q_2 = c'_2 N_{c(2)} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma(2)} \dots \dots \dots (14)$$

Si la altura H es relativamente grande, entonces la superficie de falla ocurrirá en la capa superior más resistente (Figura 32 b), por lo que " q_u " para una cimentación continua en este caso se asume como:

$$q_u = q_t = c'_1 N_{c(1)} + q N_{q(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma(1)} \dots \dots \dots (15)$$

Donde: $q = \gamma_1 D_1$; y, si H es relativamente pequeña, q_u , está representado por:

$$q_u = q_b + \frac{2c'_a H}{B} + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H} \right) \frac{K_s \tan \phi'_1}{B} - \gamma_1 H \leq q_t \dots (16)$$

Aquí, q_t , determinado a partir de las propiedades de la capa superior (despreciando la influencia de la capa inferior), es el límite superior para el valor de la capacidad de carga última calculado usando la Ec. (15). Los factores de profundidad no se consideran aquí, y, asimismo, se tiene que:

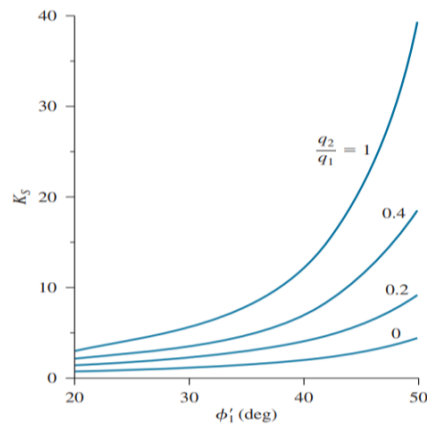
$N_{c(1)}$, $N_{q(1)}$, $N_{\gamma(1)}$ y $N_{c(2)}$, $N_{q(2)}$, $N_{\gamma(2)}$: Factores de capacidad de carga para el ángulo de fricción ϕ'_1 y ϕ'_2 respectivamente.

K_s = Coef. de punzonamiento, es una función de q_2/q_1 y ϕ'_1 ; o, específicamente,

$$K_s = f\left(\frac{q_2}{q_1}, \phi'_1\right) \dots \dots \dots (17)$$

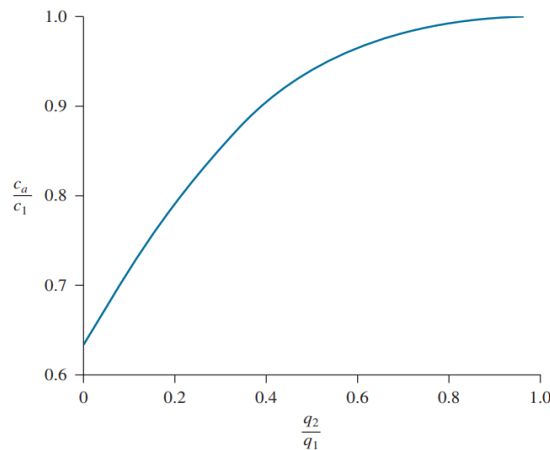
Además, se tienen las gráficas de correlación del coeficiente de punzonamiento K_s y variación de C_a/C_1 con q_2/q_1 basadas en la teoría de Meyerhof y Hanna (1978).

Figura 33: Correlación de coeficiente de punzonamiento K_s



Fuente: (Das & Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 2019, pág. 271)

Figura 34: Correlación de variación basada en la teoría de Meyerhof y Hanna .



Fuente: (Das & Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 2019, pág. 271)

Este método es el que mejor se acondiciona a nuestro caso, dado que el suelo fuerte referencia al suelo mejorado sobre el terreno natural de suelo débil.

3.8.5.3 Tipo de cimentación:

(Process Industry Practices (PIP), 2005) sostiene que la selección de un tipo de cimentación está en función del tamaño del tanque, las condiciones del terreno y los requisitos de impactos ambientales.

A. Elección del tipo de cimentación

En la elección, tuvo preponderancia la norma API 650; pues, ésta recomienda cuatro tipos de cimentaciones superficiales típicas, como:

- Cimentaciones de tierra sin anillo
- Cimentaciones de tierra con anillo de hormigón
- Cimentaciones de tierra con un anillo de piedras trituradas y grava
- Cimientos de Losa

De las cuales, se eligió según el tipo y tamaño de la estructura, condiciones del terreno y clima, y también por las consideraciones del numeral 3.8.2), en la que enfoca la alternativa de la técnica de estabilización de suelos en la mejora del terreno de cimentación; y, por correspondencia entre el tipo de cimentación y la técnica de mejora de suelos, se tiene que las cimentaciones de tierra con anillo de piedras trituradas y grava tienen relación análoga a nuestro planteamiento de una cimentación mixta de tierra con anillo de material estabilizado.

Además, (Process Industry Practices (PIP), 2005), recomienda como alternativa para este tamaño de tanque grande (diámetro de 50 pies o más), pared circular de concreto (preferido) o debe usarse un “ringwall” de piedra triturada.

B. Predimensionamiento

Para el pre dimensionamiento, se tomó antecedentes de las referencias en las consideraciones del numeral 3.8.1.5) de mejora de suelos para tanques en la zona de La Pampilla - Lima, como se ilustra en la tabla adjunta:

Tabla 35: Recomendaciones de tipos de cimentaciones en tanques.

Ítem	Tipo de estructura	Tipo de cimentación	Área de terreno mejorado	Tipo de material	Fuente
01	Tanque grande ($D_t = 48.30$ m y $H_t = 19.20$ m)	Cimentación de tierra con anillo de suelo mejorado.	Anillo perimetral cuadrada (ancho $A = 2.50$ m y $H = 2.50$ m de profundidad).	Material granular de base	Estudio geotécnico del lugar de La Pampilla
02	Tanque mediano ($D_t = 21.00$ m y $H_t = 14.40$ m)	Cimentación con anillo de hormigón y sub rasante mejorado	Superficie circular (diámetro $D_a = 21+6$ m adicional) con profundidad de $H = 3.0$ m.	Material granular de un afirmado	Estudio de investigación del lugar de La Pampilla

De lo anterior, se tomó como premisa las dos referencias para considerar un sistema mixto de suelo mejorado de material estabilizado, aunque la sección de pared de anillo circular fue según sección recomendada por la norma API 650 (ver figura N°06), y, a su vez, se evaluará un anillo de pared de sección cuadrada como se describe en la siguiente tabla para las dos alternativas.

Tabla 36: Descripción del pre dimensionamiento de la cimentación propuesta con suelo mejorado

Alternativa	Tipo de estructura	Tipo de cimentación	Área de terreno mejorado	Tipo de material
Alternativa N° 01	Tanque grande ($D_t = 48.30$ m y $H_t = 19.20$ m)	Cimentación mixta con anillo de muro y sub rasante circular con suelo mejorado.	Anillo perimetral de muro de sección trapezoidal ($H = 6$ m, $c = 18$, $a = 3$ m, y pendientes de taludes laterales según norma API 650), y sub rasante circular de 2.0 m de espesor.	Suelo de grano fino CL y suelo granular grueso GM
Alternativa N° 02	Tanque grande ($D_t = 48.30$ m y $H_t = 19.20$ m)	Cimentación mixta con anillo de muro y sub rasante circular con suelo mejorado.	Anillo perimetral de muro de sección cuadrada ($A = 6.0$ m con $H = 6.0$ m de profundidad y superficie circular de sub rasante con una profundidad de 2.0 m)	Suelo de grano fino CL y suelo granular grueso GM

Donde, se incrementó la dimensión del ancho de la base del anillo “A” con respecto al primer ítem de la referencia, dado que en éste, presenta valores superiores del 113% y 33.3% de ángulo de fricción y cohesión respectivamente en comparación a nuestro estudio geotécnico; a su vez, se incrementó la altura del estrato fuerte, por la condición de asumir que la ocurrencia de la superficie de falla suceda en el estrato fuerte (caso b), de la figura 32 del método casuístico del literal B) del numeral 3.8.5.2); y, asimismo, con respecto al segundo ítem de la referencia, se aumentó la profundidad “H” de mejora en el anillo de estabilización, por el hecho mismo de que nuestra estructura representa dimensionalmente el doble de esta referencia, pero, se disminuyó la mejora de la sub rasante circular, dado que, los esfuerzos en este tipo de estructuras se concentran perimetralmente en la base del tanque.

3.8.5.4 Factor de seguridad

EL factor de seguridad que se tomó fue medianamente moderado de 3, (Bowles J. E., 1997, pág. 276) para el cálculo de la carga admisible bruta, según:

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS} \dots \dots \dots (18)$$

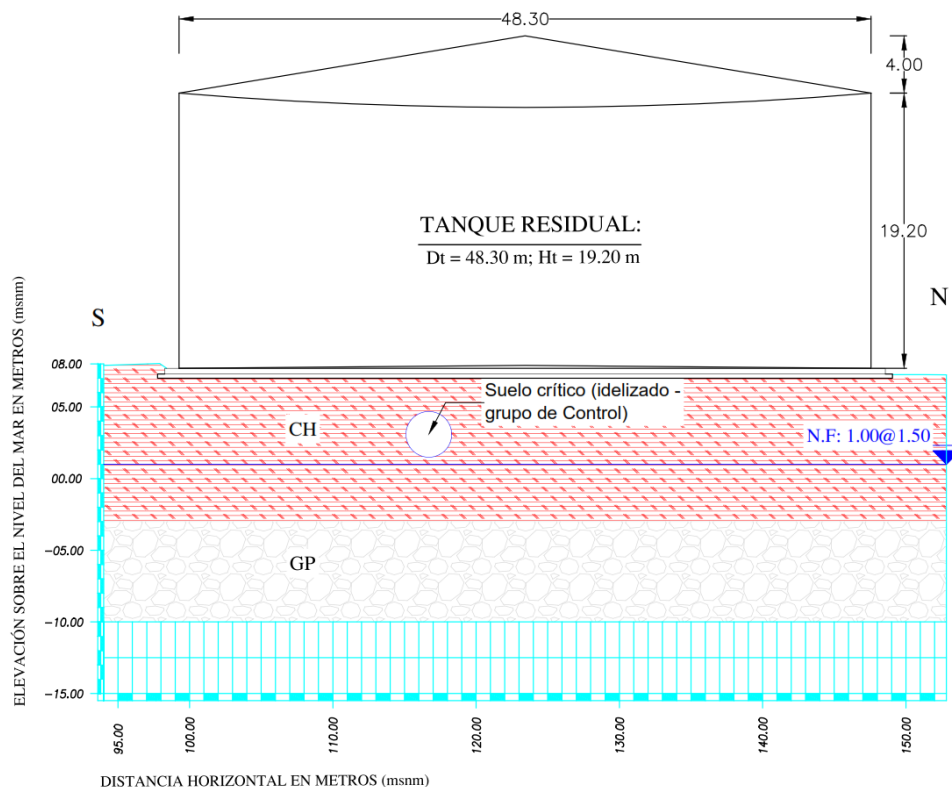
3.8.5.5 Consideraciones del modelo de diseño de cálculo de capacidad portante

Se desarrolló, evaluó y focalizó la capacidad portante sólo en el componente del sistema de anillo de suelo mejorado, tanto para el grupo de control como para el grupo experimental, asumiendo una cimentación corrida de ancho “B”, y de ello se tiene:

A. Caso N° 01: Terreno sin mejoramiento

En primer lugar, se idealizó el modelo de diseño para el grupo de control (GC); es decir, se asumió dos estratos bien definidos como se aprecia en la figura adjunta, donde el estrato de suelo estratigráfico crítico desfavorable se idealizó como homogéneo de suelo grano fino CH correspondiente a la calicata C-04' ($H = +7.0 \text{ m} @ -3.0 \text{ m} = 10.0 \text{ m}$ de promedio de espesor), en su condición natural antes de ser mejorado, y, como estrato inferior, se tiene al suelo granular grueso GP ($H = +7.0 \text{ m} @ -13.0 \text{ m} = 13.0 \text{ m}$ de promedio de espesor), como se ilustra en la figura a continuación:

Figura 35: Modelo idealizado (homogenizado), del terreno en su condición crítica (grupo de control GC)



B. Caso N°02: Terreno con mejoramiento

Para el grupo experimental (GE), se diseñó un modelo idealizado general de un terreno con tres estratos bien definidos para los cuatro tratamientos de estabilización, en la cual se idealiza el caso del suelo de estrato fuerte (terreno mejorado) sobre suelo de estrato débil (suelo crítico “CH” homogenizado); en la que el estrato fuerte tiene una

sub rasante circular y anillo de pared de sección trapezoidal de suelo mejorado como primera alternativa y complementariamente una segunda alternativa, con disposición similar a la anterior, con la diferencia en la sección de anillo de tipo cuadrada para su evaluación. Asimismo, se precisan otras consideraciones e ilustra a continuación:

Figura 36: Modelo idealizado de suelo de estrato fuerte sobre suelo débil (anillo de sección trapezoidal).

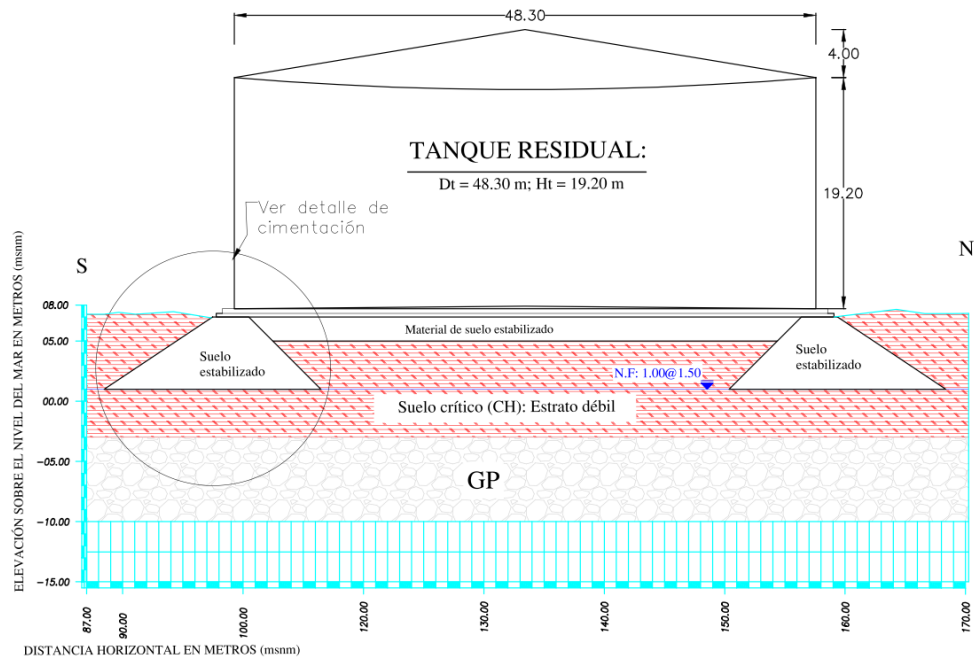
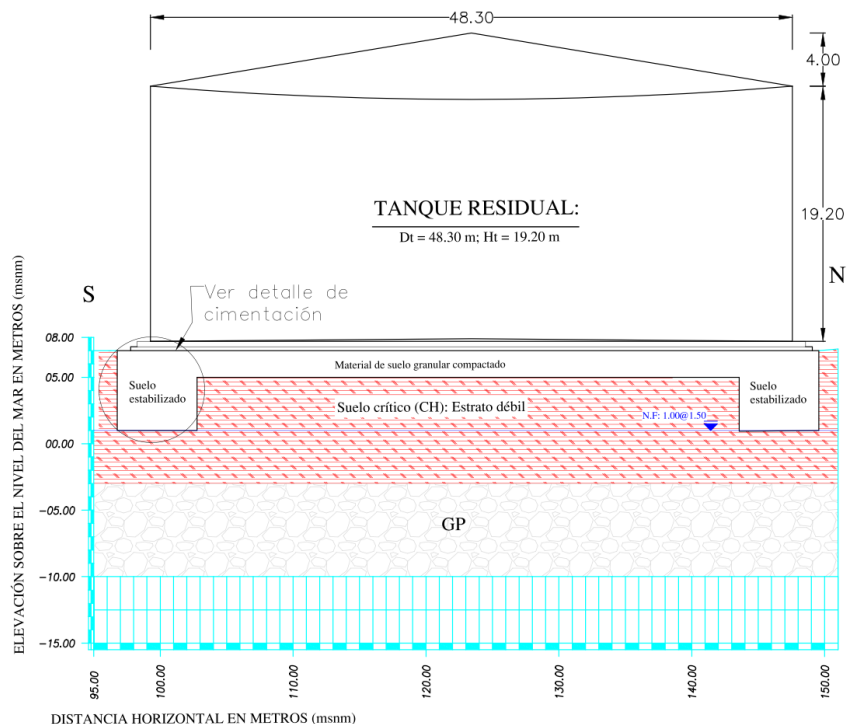


Figura 37: Modelo idealizado de suelo de estrato fuerte sobre suelo débil (anillo de sección cuadrada).



1.- Se idealizó y acondicionó el tratamiento de mejora de suelos en terrenos desfavorables a la casuística del caso del cálculo de capacidad de carga en capas de suelo más fuerte sobre suelo más débil que fue descrito en el literal B) del numeral 3.8.5.2). Por lo que, nuestro sistema de suelo de terreno mejorado presenta tres estratos bien definidos como:

- a. Primer estrato: Suelo de estrato superior más fuerte (suelo mejorado a través de la técnica de la estabilización).
- b. Segundo estrato: Suelo de estrato inferior más débil (suelo más crítico de condición desfavorable).
- c. Tercer estrato: Suelo de material granular GP (suelo consolidado fuerte).

De los cuales, sólo se estudiaron los dos primeros, de acuerdo a la casuística de suelo fuerte sobre suelo débil antes referenciada.

2.- El estrato de capa de suelo fuerte (suelo mejorado) se consideró bajo el método de cimentación de tierra con anillo de material estabilizado, como alternativa análoga al tipo cimentaciones de tierra con anillo de piedras trituradas y grava, y que fue descrito en el numeral 3.8.1.5) y 3.8.2.1), el cual se ilustra el detalle de la misma, para las dos alternativas en la figura adjunta.

Figura 38: Detalle de sección anular trapezoidal de suelo mejorado recomendado por norma API 650.

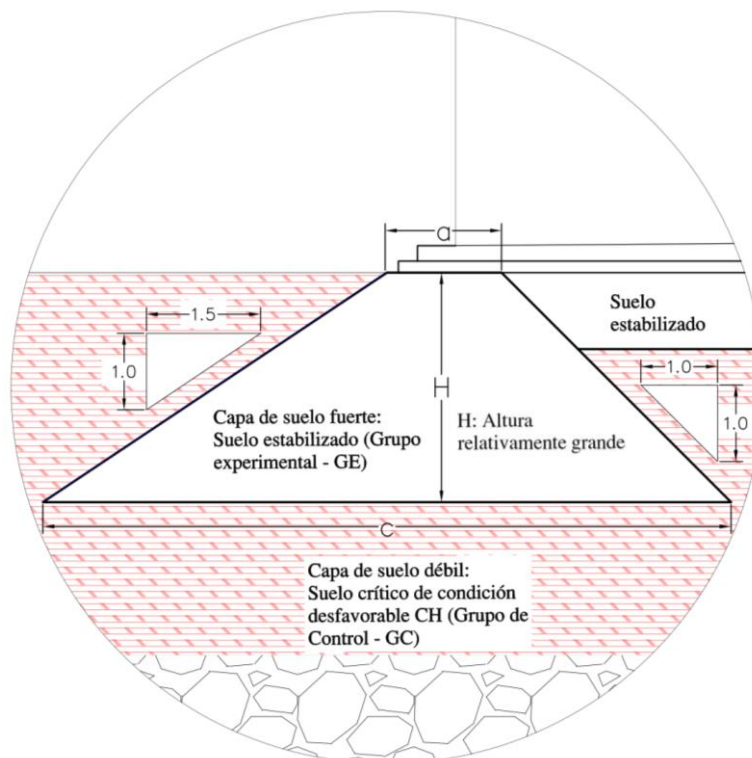
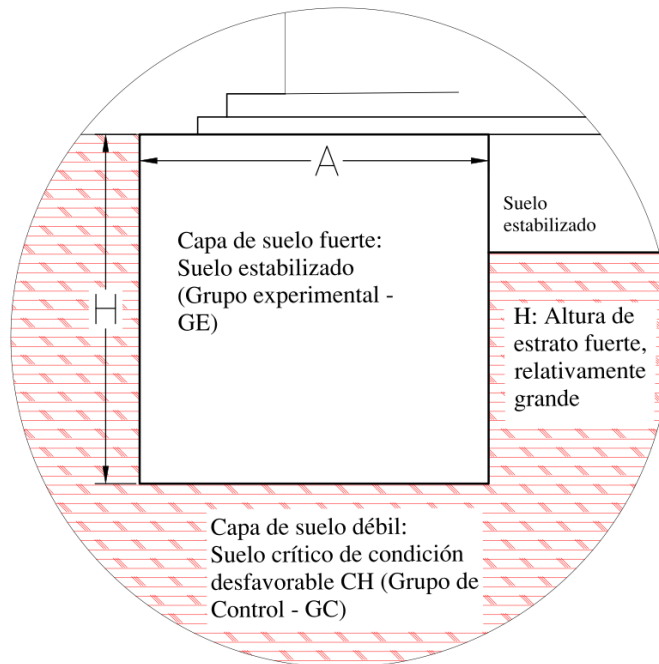


Figura 39: Detalle de sección anular cuadrada como alternativa de suelo mejorado.



- 3.- Los cuatro tratamientos de estabilización con sus respectivas variantes de tipos materiales de suelos e insumos, fueron descritos en el numeral 3.8.2).
- 4.- De otro lado, por la condición asumida del caso (b) H grande de la figura N°32, de que la falla del suelo lo absorbería la capa de suelo fuerte (suelo estabilizado), como lo describe el método en el literal B) del numeral 3.8.5.2), se tiene que el suelo débil (suelo crítico "CH") considerado no sufrirá ninguna falla de resistencia cortante; es decir, se cumplirá la condición de $q_u = q_t$; por lo tanto, se obvió el análisis de la capacidad de carga ante la presencia del nivel freático en la cota + 1.00 a 1.50 m.s.n.m.

3.8.5.6 Cargas de diseño

Se consideraron las cargas de servicio estáticas para determinar la capacidad de carga; las cuales están definidas a continuación y dadas en la tabla adjunta:

$$\text{Carga de servicio} = \text{carga viva} + \text{carga muerta}$$

Carga viva. – Es el peso del producto almacenado al nivel máximo de líquido de diseño.

Carga muerta. - Está dado por el peso del recipiente, el cual está conformado por la carcasa, techo, placas inferiores, escaleras de acceso, plataformas, boquillas, bocas de acceso, columnas de soporte del techo y entre otros.

Tabla 37: Datos de cargas de servicio de la estructura del tanque proyectado

Ítem	Carga muerta (peso del recipiente, Tm)	Carga viva (Peso lleno de agua, Tm)	Peso Total, Tm
Tanque residual 220 MBbl	670	35,000	35,670

Fuente: (UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)

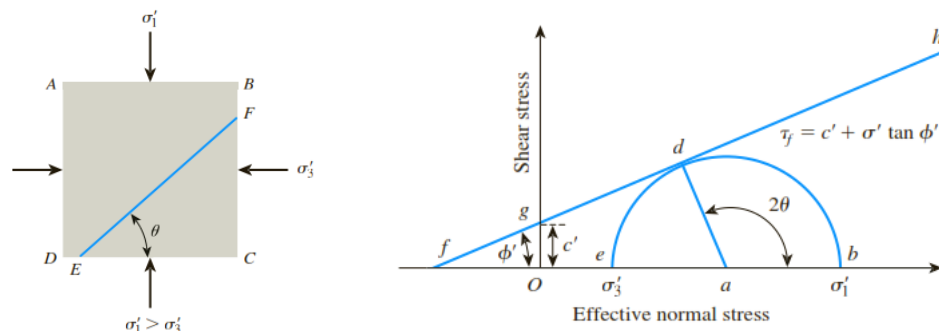
3.8.5.7 Parámetros de resistencia al corte

Se determinó a través de los ensayos de compresión triaxial UU, según a las consideraciones dadas en el literal b) del numeral 3.8.4.1) con la finalidad de realizar las comparativas, análisis y contrastes de los efectos de los factores de la estabilización de suelos sobre las variables de respuesta de los parámetros (C_u y ϕ_u); y, asimismo, a partir de éstos, determinar la capacidad de carga última según a las ecuaciones 13, 14 y 15 del literal B) del numeral 3.8.5.2) según corresponda, simular y modelar el mejoramiento de terreno a través de un software computacional; y los parámetros son:

La cohesión aparente (C_u): Se determinó sólo la cohesión aparente no drenada con este tipo de ensayo, a través de la elaboración de la gráfica del círculo de Mohr, donde la intersección de la ordenada (resistencia cortante " τ ") con la envolvente de falla de la gráfica del círculo de Mohr-Coulomb determina este parámetro según la figura adjunta de la derecha.

El ángulo de fricción interna (ϕ_u): Se determinó el ángulo de fricción no drenada por las características de este tipo de ensayo, y resultó del ángulo que forma entre la envolvente de fallas de la gráfica Mohr Coulomb y eje de la abscisa del esfuerzo normal (σ) como se aprecia en la figura de la derecha adjunta.

Figura 40: Inclinación del plano de falla en suelo con plano principal mayor a la izquierda y círculo de Mohr y envolvente de falla a la derecha



Fuente: (Das & Sobhan, Principles of Geotechnical Engineering, 2018, pág. 472)

3.8.6 Asentamientos

Las estructuras como tanques y losas de concreto armado, usualmente se construyen en suelos blandos; y tienen mayor atención en su diseño de cimentación a

la falla por corte que por el asentamiento, dado que los asentamientos uniformes, relativamente grandes, son más tolerables para las losas de edificios o las losas flexibles debajo de los tanques atmosféricos (Bowles J. E., 1997, pág. 213).

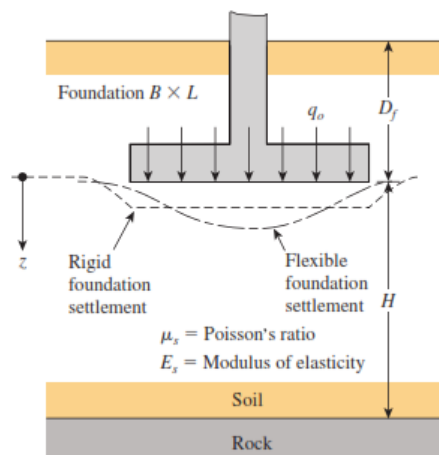
Sin embargo, (Process Industry Practices (PIP), 2005, pág. 36), sostiene que los asientos de los tanques han originado averías tales como en los techos flotantes, fallas por pandeo de la carcasa y el techo, fugas y pérdida del contenido del tanque. Por ello, el asentamiento puede ser influido significativamente por el tipo de diseño del cimiento, características del terreno, geometría y carga del tanque y el drenaje.

(Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015) afirma que el asentamiento se tipifica en dos: asentamiento por consolidación primaria (S_p) y secundaria (S_s); y asentamiento elástico (S_i), de los cuales conforman el asentamiento total (S_T), como:

$$S_T = S_i + (S_p + S_s) \dots \dots \dots (19)$$

Y por el tipo de cimentación flexible propuesta, el tanque tendrá un asentamiento elástico representado por una trayectoria curva como la que se muestra en la figura adjunta y que es distinta a una cimentación rígida, y, a su vez, éste dependerá primordialmente del módulo de rigidez y el coeficiente de Poisson.

Figura 41: Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas



Fuente: (Das & Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 2019)

3.8.6.1 Modos de asentamientos en tanques

(Thusyanthan & Enriquez, 2022), afirma que el Instituto Americano del Petróleo (API), la Asociación de Usuarios de Materiales y Equipos de Ingeniería (EEMUA) y las Prácticas de la Industria de Procesos (PIP) son los entes rectores usuales de estándares y guías para el diseño y el rendimiento de los cimientos de tanques; y son éstos los que

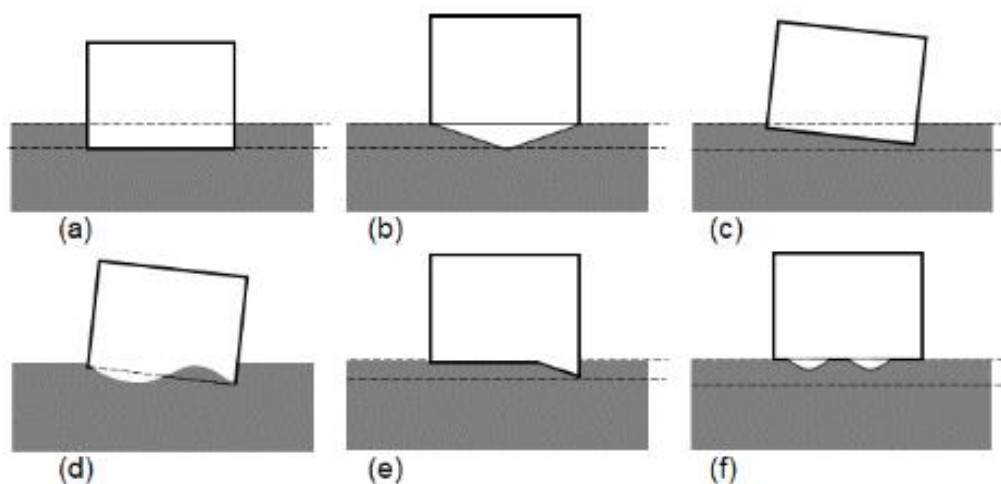
identificaron y tipificaron diferentes modos de asentamientos como se ilustra en la tabla y figura adjunta; y, a su vez, sostiene que, en el diseño, el asentamiento uniforme y el asentamiento del centro a la periferia son indicadores primordiales en la evaluación de la necesidad de mejora del terreno de sitio.

Tabla 38: Modos de asentamientos de cimientos de tanques por diferentes estándares.

Norma	Modos de asentamiento
API 653	1. Asentamiento uniforme 2. Inclinación plana 3. Asentamiento diferencial (liquidación fuera del plano) 4. Asentamiento de borde 5. Asentamiento en el fondo cerca del cuerpo del tanque 6. Asentamiento del fondo localizado Remoto del cuerpo del tanque
EEMUA 159	1. Asentamiento uniforme (uniforme) 2. Asentamiento de la carcasa del tanque en los cimientos 3. Centro a periferia 4. Asentamiento desigual 5. Asentamiento de borde 6. Inclinación plana 7. Asentamiento diferencial de la lámina alrededor de la circunferencia
PIP STE02030	1. Asentamiento uniforme 2. Inclinación plana 3. Asentamiento diferencial 4. Asentamiento de borde 5. Platos globales

Fuente: (Thusyanthan & Enriquez, 2022)

Figura 42: Modos de asentamiento del tanque



Fuente: (Thusyanthan & Enriquez, 2022)

De la figura adjunta, se tienen los modos: (a) Asentamiento uniforme (b) Asentamiento diferencial centro a periferia (c) Inclinación plana (d) Asentamiento diferencial alrededor de la circunferencia (e) Asentamiento en el borde (f) Asentamiento de fondo localizado.

De todos estos asentamientos, los estándares se engloban en tres principales:

- Asentamientos uniformes, que no presentan graves consecuencias, pero sí es necesario advertirlo para evitar inconvenientes en la operación de la estructura.
- Asentamientos diferenciales son muy críticos, porque son causal de falla en los demás elementos estructurales del tanque y porque en ésta se involucra la deflexión de la estructura a escala local y por ende se originan esfuerzos locales.
- Inclinação plana es acompañada con un asentamiento uniforme, y es severo cuando el desplazamiento es extremo.

3.8.6.2 Tolerancia estructural al asentamiento

De todos los asientos, el más crítico es el asentamiento diferencial, y se tienen estimaciones de asentamientos permisibles según al tipo de estructura y/o material; y, para tanques, existen algunas estimaciones dadas por otras normas y autores.

Según normas y directrices, se tienen asentamientos permisibles por cada uno de ellos como se describen en las tablas adjuntas:

Tabla 39: Asentamiento circunferencial diferencial permitido

Estándar	Criterios de evaluación
API 653	CASO 1: Asentamiento de la coraza del tanque con un plano claro de inclinación rígida definido por una curva coseno. $S_{max} = \frac{(11000 * Y * L^2)}{2 * E * H_t}$ S_{max} = asentamiento fuera del plano admisible [mm] L = longitud de arco entre puntos de medición [m] Y = límite elástico del material de la cubierta [MPa] E = módulo de Young del material de la cubierta [MPa] H_t = altura del tanque [m].
	CASO 2: Para perfiles de asentamiento sin un plano de inclinación rígido bien definido, en la sección B.3.2.2 de la norma se proporciona una orientación alternativa para determinar el asentamiento permisible fuera del plano.
API 625	10 mm en un arco de 10 m (asentamiento tangencial < 1/1000)
EEMUA 159	a) limitado a 1/100 entre dos puntos adyacentes cualesquiera (1% de la longitud del arco). b) 300 mm entre dos puntos cualesquiera para tanques de techo fijo de gran diámetro ($D_t \geq 36$ m) sin cubierta flotante interna. c) Según API 653 para tanques de techo flotante de gran diámetro ($D_t \geq 40$ m) y tanques de techo fijo de gran tamaño con cubierta flotante interna.
PIP STE03020	$L/450$ o como API 653 L = longitud entre lecturas de asentamiento.
*Nota: API 650 recomienda 13 mm por 10 m de circunferencia y 50 mm de asentamiento uniforme como valores de detección durante la prueba hidrostática.	

Fuente: (Thusyanthan & Enriquez, 2022)

Tabla 40: Asentamientos diferencial de centro a borde (pandeo)

Estándar	Criterios de evaluación
API 653	No especificado
API 625	$<R/240$, R = radio del tanque
EEMUA 159	$f_{max} = \frac{d}{100} * \sqrt{\left(\left(\frac{f_0 * 100}{D_t}\right) + 3280 * \frac{Y}{E}\right)}, o D_t/50 \text{ cuando } f_0 = 0 \text{ mm}$ f_{max}= asentamiento máximo permitido de centro a borde en el fondo del tanque [mm]; d = diámetro del plato en el piso [mm]; D_t = diámetro del tanque [mm]; f_0= diferencia de altura del piso según construcción entre el centro y el cuerpo del tanque, con un máximo de 300 mm; Y = límite elástico máximo especificado del material de la placa de piso con un máximo de 250 MPa; E = módulo de Young del material de la placa del piso a la temperatura de funcionamiento [MPa]
PIP STE03020	$D_t/50$ to $D_t/100$; D_t = diámetro del tanque.

Fuente: (Thusyanthan & Enriquez, 2022)

Tabla 41: Asentamientos permisibles para diámetros de tanque de 20m, 50m y 100m

Estándar	Diámetro del tanque (D_t), m		
	20	50	100
Asentamiento diferencial circunferencial permisible			
API 653	27.5 mm (H_t =25m, E = 200KN/mm2, Y = 200 N/mm2)		
API 625	10 mm en un arco de 10 m		
EEMUA 159	1/100 entre dos puntos adyacentes (1% de la longitud del arco) o como b) y c) en la Tabla 39		
PIP STE03020	Igual que API 653 o L/450		
Asentamiento diferencial permitido de centro a borde (hundimiento)			
API 653	No especificado		
API 625	42 mm	104 mm	208 mm
EEMUA 159 (fo = 0 mm; D/50)	400 mm	1000 mm	2000 mm
PIP STE03020	200-400 mm	500-1000 mm	1000-2000 mm
Inclinación plana permitida			
API 653	No especificado		
API 625	5 mm	12.5 mm	25 mm
EEMUA 159	200 mm	400 mm	400 mm
PIP STE03020	No especificado		

Fuente: (Thusyanthan & Enriquez, 2022)

De otro lado, (Maza Palop, 2020), estima tres criterios de asiento diferencial admisible:

- Según Akhavan-Zanjani, en tanques grandes, el asiento es igual a $D_t/145$.
- Según norma DIN 4119, independientemente del tamaño, es igual a $D_t/50$.
- Según la Japanese Fire Defense Agency, el asiento admisible es hasta $D_t/100$.

Asimismo, (Bowles J. E., 1997) sostiene que el asentamiento diferencial puede estimarse como las tres cuartas partes del asentamiento total máxima calculado, o debe cumplir la relación máxima de $\delta/L < 1/300$ para tanques de almacenamiento.

Por lo tanto, para nuestro estudio del tanque ($D_t = 48.30$ m y $H_t = 19.20$ m), se tienen determinados los asientos diferenciales (δ), según dimensión del tanque a partir de criterios de autores y normas; y también se presentan los asentamientos totales (ΔH), a partir de las diferenciales según Bowles ($\delta = \frac{3}{4}\Delta H$), como se detalla en la tabla adjunta:

Tabla 42: Asiento total determinado a partir de asientos diferenciales según normas y autores

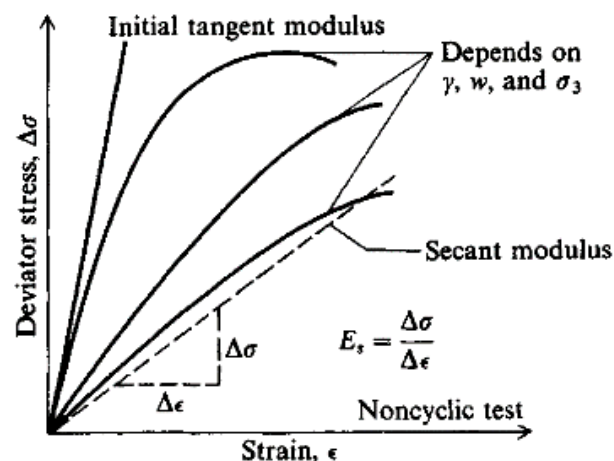
Según norma y/o autor	Criterio de δ (m)	δ (m)	" ΔH " (m) según Bowles
Akhavan - Zanjani	$D_t / 145$	0.333	0.444
Norma DIN 4119	$D_t / 50$	0.966	1.288
Janesse Fire Defense Agency	$D_t / 100$	0.483	0.644
PIP STE03020 (asentamiento de centro a borde: $D_t/50 @ D_t/100$)	$D_t / 75$	0.644	0.857
API 625	R/240	0.101	0.135
EEMUA 159 ($D_t = 50$ m)	1.0	1.000	1.333

3.8.6.3 Parámetros elásticos

(Bowles J. E., 1997, pág. 284) afirma que, aunque un asentamiento ΔH está conformado por una parte elástica muy diminuta, es oportuno tratar el suelo como un material pseudoelástico con parámetros "elásticos" E_s, G', μ y K_s para determinar los asientos. De los cuales se referencian los más preponderantes como:

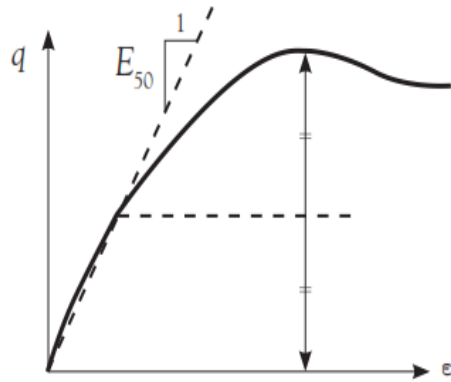
Módulo de Young (E_s): Está referido al coeficiente relacionado con la variación del esfuerzo y deformación a nivel longitudinal, del cual se usó el módulo secante E_{s0} a partir de los procedimientos que se detallan en las figuras adjuntas.

Figura 43: Módulo esfuerzo deformación tangente inicial y módulo secante



Fuente: (Bowles J. E., 1980-81, pág. 122)

Figura 44: Diagrama del módulo secante E_{50}



Fuente: (Nieto Leal, Ruiz Blanco, & Camacho Tauta, 2009, pág. 83)

(Nieto Leal, Ruiz Blanco, & Camacho Tauta, 2009, pág. 83), recomienda el uso del módulo secante a un 50% (E_{50}) del esfuerzo máximo de resistencia sobre el módulo tangente inicial, porque tiene mayor confiabilidad y representación debido al comportamiento no lineal típico de los suelos normalmente consolidados.

El módulo de corte (G'_s): Está definido como la relación entre el esfuerzo cortante S_s y la deformación unitaria ϵ_s , y está dado por:

$$G'_s = \frac{S_s}{\epsilon_s} = \frac{E_s}{2(1+\mu)} \dots \dots \dots \text{Ecuación N°20}$$

La relación de Poisson (μ) está definida como la relación entre la compresión axial ϵ_v y las deformaciones de expansión lateral ϵ_L como:

$$\mu = \frac{\epsilon_L}{\epsilon_v} \dots \dots \dots \text{Ecuación N° 21}$$

Tabla 43: Valores o rango de valores para la relación de Poisson

Type of soil	μ
Clay, saturated	0.4–0.5
Clay, unsaturated	0.1–0.3
Sandy clay	0.2–0.3
Silt	0.3–0.35
Sand, gravelly sand	–0.1–1.00
commonly used	0.3–0.4
Rock	0.1–0.4 (depends somewhat on type of rock)
Loess	0.1–0.3
Ice	0.36
Concrete	0.15
Steel	0.33

Fuente: (Bowles J. E., 1997, pág. 123)

El módulo de reacción de la subrasante (K_s), se define la relación del incremento de la presión de contacto ($\Delta\sigma$) y el cambio correspondiente en asentamiento o deformación ($\Delta\delta$).

$$K_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\delta} \dots\dots\dots \text{Ecuación N° 22}$$

3.8.6.4 Modelamiento y cálculo computacional del asiento

Por sus bondades de precisión y versatilidad del software, se utilizó PLAXIS 2D sobre el 3D, por la mayor precisión de ésta, y menor tiempo y uso de memoria del CPU en los cálculos. (Bentley Communities, 2018), Verificó y validó las diferencias de precisión entre estos dos en una cimentación flexible de un tanque; y determinó reportes de menor porcentaje de error al PLAXIS 2D como se ilustra en la tabla adjunta:

Tabla 44: Comparación de asientos en tanques entre solución analítica y resultados de PLAXIS.

Asentamiento en el centro del tanque (mm)			Error	
Lancellota	PLAXIS 2D	PLAXIS 3D	PLAXIS 2D	PLAXIS 3D
74.44	74.21	75.60	0.3%	1.6%

Fuente: (Bentley Communities, 2018)

Software PLAXIS: Es un software de cálculo computacional geotécnico que utiliza métodos de elementos finitos con una interfaz de Windows de entrada de datos, interfaz gráfica CAD 2D y 3D para la edición, dibujo, generación de mallas de elementos finitos, condiciones de flujo, proceso constructivo, cálculo y visualización de resultados.

El proceso de modelamiento en el programa PLAXIS se dividió en tres etapas para los grupos de investigación (grupo de control y grupo experimental) y está dado por:

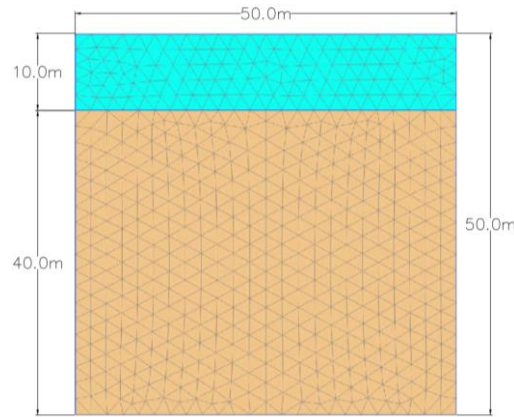
- A. Primera etapa (Input):** Entrada de la geometría del modelo propuesto, valores de las propiedades de los materiales y condiciones de contorno de éste. Las dimensiones partieron del pre-dimensionamiento preliminar.

A.1 Geometría del modelo

(Bentley Communities, 2018) reportó un modelo geométrico axisimétrico con material homogéneo del terreno y con dimensiones de límite derecho e inferior de cinco veces el radio del tanque (5R); sin embargo, para nuestro problema se planteó sólo con aproximación a dos veces el radio del tanque (2R), pues las dimensiones alcanzaron a los 50 metros, tanto de lado horizontal derecho al eje de simetría central del tanque (límite izquierdo), como lado vertical inferior para un tanque circular de radio $R = 24.15$ m, y se dispuso para los dos casos en estudio sólo la mitad del modelo por ser simétrico al eje (modelo axisimétrico), como se describe a continuación:

Caso 1: Terreno sin mejora, corresponde a las consideraciones del literal A) del numeral 3.8.5.5), del cual, se define e idealiza el modelo axisimétrico en dos estratos bien definidos, como se detalla en el siguiente modelo geométrico del Plaxis 2D.

Figura 45: Modelo geométrico de terreno sin mejor en el programa Plaxis 2D



Caso 2: Terreno con mejoramiento, corresponde a las consideraciones del literal B) del numeral 3.8.5.3) y 3.8.5.5), en la que se define el modelo axisimétrico en tres estratos, y donde el estrato mejorado es idéntico al que recomienda la norma API 650 (Ver figura N° 06: cimentación de tierra con muro de anillo con piedra triturada y grava), con una sección mixta de anillo perimetral de sección trapezoidal (base menor $a = 3.0$, base mayor $C = 18.0$ m, talud 1:1 lado izquierdo y 1:1.5 de lado derecho, con profundidad de $H = 6.0$ m y superficie circular de sub rasante con una profundidad de 2.0 m), como primera alternativa a evaluar; Asimismo, se modeló como segunda alternativa de estrato mejorado con sección mixta de Anillo perimetral de sección cuadrada (ancho $A = 6.0$ m y profundidad $H = 6.0$ m y superficie circular de sub rasante con una profundidad de 2.0 m). De los cuales, estas dos alternativas de modelos en Plaxis 2D se ilustran a continuación.

Figura 46: Modelo geométrico de terreno mejorado con anillo de sección trapezoidal

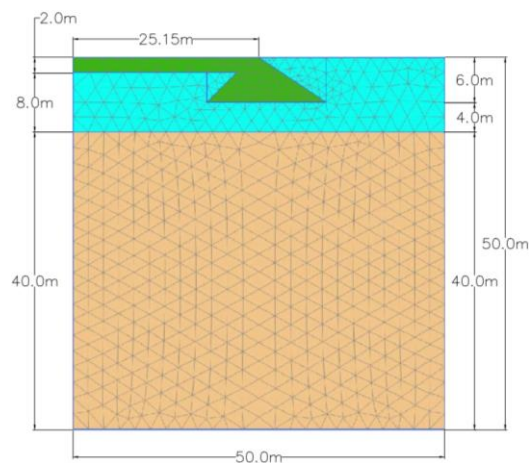
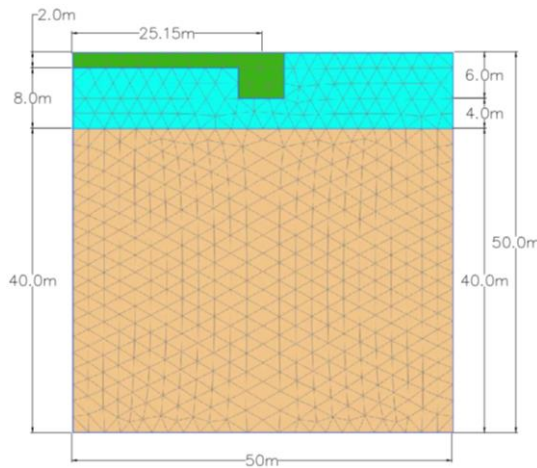


Figura 47: Modelo geométrico de terreno mejorado con anillo de sección cuadrada



A.2 Materiales:

Se definió un análisis de un comportamiento elastoplástico de Mohr Coulomb para los materiales en ambos casos, y sus respectivas propiedades geotécnicas determinadas en el EMS para cada grupo de investigación.

A.2.1 Tipo de drenaje de los materiales:

Se consideró y acondicionó dos modelos bajo dos condiciones específicas según las condiciones del terreno, y está dado por:

Condición no drenada (undrained B): Se asumió esta condición para los estratos de suelo crítico "CH" idealizado y suelo mejorado, pero la condición es aplicable parcialmente, dado que existe nivel freático en el nivel +1.0; pero por cuestiones académicas se obvió la representación real en su totalidad; asimismo, los parámetros de resistencia y elásticos fueron obtenidos de ensayos triaxiales UU, y de ello, se tienen algunas consideraciones en estos dos estratos bajo esta condición, como:

(*) El valor de $E_{ref(50)}$ es el promedio de los tres esfuerzos de compresión triaxial (Nieto Leal, Ruiz Blanco, & Camacho Tauta, 2009).

(**) La relación de Poisson " ν " se asumió de la tabla N°43

(***) Los valores " c ", " ψ " y " ϕ " son cero por la condición undrained (B) del suelo.

(****) El valor de la resistencia al corte es igual a la cohesión para una condición no drenada, $S_u = C_u$ según (Bentley Communities, 2018).

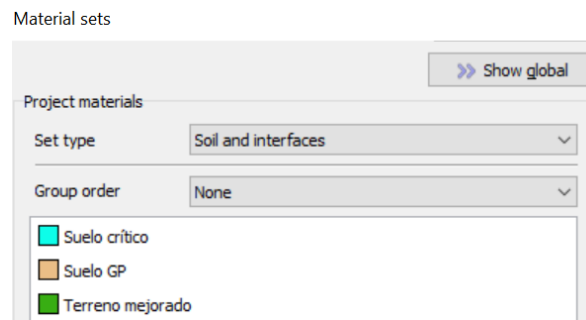
Condición drenada (drained): Se asumió esta condición para el estrato inferior (suelo GP) por su representación en el terreno, aunque no fue posible determinar los

parámetros geotécnicos de su condición real; sin embargo, éstos se asumieron por similitud con suelo de grava de (Maza Palop, 2020) con fines académicos.

A.2.2 Características de materiales:

Se consideraron características generales y propiedades geotécnicas que demanda el programa para los tres estratos con su nombre respectivo, y están dados por:

Figura 48: Nombres de los materiales de los estratos en el modelo de PLAXIS



4. Suelo crítico (estrato superior):

Esta capa está comprendida por las características del suelo de grano fino CH, predefinida e idealizada correspondiente a la calicata C-04' con un espesor promedio de 10 m ($h = +7.0 \text{ m} @ -3.0 \text{ m}$), según criterios de diseño y recomendaciones del presente estudio, y está dado por las siguientes características generales y específicas:

Tabla 45: Características generales del estrato superior idealizado

Ítem	Características	Nombre o símbolo	Descripción
1.0	Identificación	Suelo crítico	Suelo de diseño de condición más desfavorable y homogenizado en un terreno estratigráfico muy variado y errático.
2.0	Modelo de material	Mohr Coulomb	Modelo de cálculo constitutivo recomendado para este tipo de suelo (Bentley Communities, 2018)
3.0	Tipo de drenaje	Undrained (B)	Según la condición del terreno y por el tipo de ensayo de prueba triaxial UU para obtener los parámetros de resistencia, es recomendable parcialmente esta condición como alternativa, según (Bentley Communities, 2018); pues, existe una parte de este estrato expuesta a nivel freático.
4.0	Tipo de suelo	Suelo de grano fino CH	Suelo fino de media a alta plasticidad
5.0	Profundidad	h	Se delimitó con la cota menor (- 3.00 m.s.n.m.) registrada en los pozos P-01 y P-02; es decir un total de 10 m de espesor.

Tabla 46: Características específicas del estrato superior idealizado

Ítem	Símbolo	Nombre	Unidad	Valor
1.0	γ_{unsat}	Peso específico no saturado	$[kN/m^3]$	13.24
2.0	γ_{sat}	Peso específico saturado	$[kN/m^3]$	17.17
3.0	$E_{ref(50)}$	Módulo de Young secante (*)	$[kN/m^2]$	5,050.00
4.0	ν	Relación de Poisson (**)	$[-]$	0.30
5.0	G	Módulo de corte	$[kN/m^2]$	1,804.00
6.0	E_{oed}	Módulo edométrico	$[kN/m^2]$	10.82E3
7.0	c	Cohesión (***)	$[kN/m^2]$	0
8.0	ϕ	Ángulo de fricción interna (***)	$[^\circ]$	0
9.0	ψ	Ángulo de dilatancia (***)	$[^\circ]$	0
10.0	$S_u = C_u$	Resistencia cortante no drenada (****)	$[kN/m^2]$	49.03

5. Suelo GP (estrato inferior):

Esta capa está comprendida por suelos granulares gruesos GP con un espesor promedio de 13.0 m ($h = -3.0 \text{ m} @ -16.0$), el cual se proyectó a un espesor de 40.0 m en el modelo. Asimismo, y por cuestiones académicas, los valores específicos de los parámetros geotécnicos se asumieron de un suelo de grava determinado por (Maza Palop, 2020), y está dado por las siguientes características generales y específicas:

Tabla 47: Características generales del estrato inferior del terreno idealizado

Ítem	Características	Nombre o símbolo	Descripción
1.0	Identificación	Suelo GP	Suelo con cantos rodados y bolonería con matriz de grava arenosa, color plumizo, saturado (UNALM/FIA/DOT-C Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017)
2.0	Modelo de material	Mohr Coulomb	Modelo de cálculo constitutivo recomendado para este tipo de suelo (Bentley Communities, 2018)
3.0	Tipo de drenaje	Drained	Según la condición del terreno, se consideró un comportamiento del material drenado o a largo plazo en el que la rigidez y la resistencia se definen en términos de propiedades efectivas según (Bentley Communities, 2018)
4.0	Tipo de suelo	Suelo granular grueso GP	Suelo granular grueso GP
5.0	Profundidad	h	(UNALM/FIA/DOT-C Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2017) identificó suelo GP en los pozos P-01 y P-02 desde la cota -3.00 m hasta los -13.00 m; sin embargo, se proyectó uniformizar a un espesor total de 40 metros.

Tabla 48: Características específicas de capa inferior de terreno idealizado

Ítem	Símbolo	Nombre	Unidad	Valor
1.0	γ_{unsat}	Peso específico no saturado	$[kN/m^3]$	20.00
2.0	γ_{sat}	Peso específico saturado	$[kN/m^3]$	21.00
3.0	$E_{ref(50)}$	Módulo de Young secante	$[kN/m^2]$	70.00E3
4.0	ν	Relación de Poisson	$[-]$	0.3
5.0	G	Módulo de corte	$[kN/m^2]$	26.92E3
6.0	E_{oed}	Módulo edometrico	$[kN/m^2]$	94.23E3
7.0	c	Cohesión	$[kN/m^2]$	0
8.0	ϕ	Ángulo de fricción interna	$[^\circ]$	45.00
9.0	ψ	Ángulo de dilatación	$[^\circ]$	15.00
10.0	$K_x = K_y$	Permeabilidad	$[m/dia]$	600.00

Fuente: (Maza Palop, 2020)

6. Estrato de terreno mejorado:

Presenta cuatro grupos experimentales de estabilización de suelos (GE-01, GE-02, GE-03 y GE-04) para el cálculo de cada modelo, cuyas características están dadas por:

3.1. Estrato de suelo CL compactado (GE-01):

Es la capa de terreno mejorado a través de la estabilización mecánica de suelos de grano fino CL, y está dado por las siguientes características generales y específicas (ver detalle en resultados de la etapa experimental y anexo):

Tabla 49: Características generales del estrato de suelo CL compactado (GE-01)

Ítem	Características	Nombre	Descripción
1.0	Identificación	Suelo CL compactado	Es el suelo de diseño por estabilización mecánica por el método de combinación de suelos in situ.
2.0	Modelo de material	Mohr Coulomb	Modelo de cálculo constitutivo recomendado para este tipo de suelo (Bentley Communities, 2018).
3.0	Tipo de drenaje	Undrained (B)	Se consideró por la condición del terreno tratado y por el tipo de ensayo triaxial UU para obtener los parámetros de resistencia, según (Bentley Communities, 2018).
4.0	Tipo de suelo	Suelo de grano fino CL	Arcilla de baja plasticidad
5.0	Tipo de cimentación	Mixta	Suelo mejorado con anillo de muro de sección trapezoidal ($C = 18.0$ m; $a = 3.0$ m y $H = 6.0$ m) y sub rasante circular de espesor de 2.0 m; y como alternativa se evaluó la variante con anillo de sección cuadrada ($A = 6.0$ m, $H = 6.0$ m y sub rasante circular de espesor de 2.0 m).

Tabla 50: Características específicas del estrato de suelo mejorado (GE-01)

Ítem	Símbolo	Nombre	Unidad	Valor
1.0	γ_{unsat}	Peso específico no saturado	$[kN/m^3]$	18.05
2.0	γ_{sat}	Peso específico saturado	$[kN/m^3]$	21.09
3.0	$E_{ref(50)}$	Módulo de Young secante (*)	$[kN/m^2]$	21, 898
4.0	ν	Relación de Poisson (**)	$[-]$	0.30
5.0	G	Módulo de corte	$[kN/m^2]$	8422
6.0	E_{oed}	Módulo edometrico	$[kN/m^2]$	29.48E3
7.0	c	Cohesión (***)	$[kN/m^2]$	0
8.0	ϕ	Ángulo de fricción interna (***)	$[^\circ]$	0
9.0	ψ	Ángulo de dilatación (***)	$[^\circ]$	0
10.0	$S_u = C_u$	Resistencia cortante no drenada (****)	$[kN/m^2]$	348.10

3.2. Estrato de suelo GM compactado (GE-02):

Es la capa de terreno mejorado a través de la estabilización mecánica de suelos granulares gruesos GM, y está dado por las siguientes características generales y específicas (ver detalle en resultados de la etapa experimental y anexo):

Tabla 51: Características generales del estrato de suelo mejorado (GE-02)

Ítem	Características	Nombre	Descripción
1.0	Identificación	Suelo GM compactado	Es el suelo de diseño por estabilización mecánica por el método de sustitución con material seleccionado.
2.0	Modelo de material	Mohr Coulomb	Modelo de cálculo constitutivo recomendado para este tipo de suelo (Bentley Communities, 2018).
3.0	Tipo de drenaje	Undrained (B)	Se consideró por la condición del terreno tratado y por el tipo de ensayo triaxial UU para obtener los parámetros de resistencia, según (Bentley Communities, 2018).
4.0	Tipo de suelo	Suelo granular grueso GM	Grava con limo y arena
5.0	Tipo de cimentación	Mixta	Suelo mejorado con anillo de muro de sección trapezoidal (C = 18.0 m; a = 3.0 m y H = 6.0 m) y sub rasante circular de espesor de 2.0 m; y como alternativa se evaluó la variante con anillo de sección cuadrada (A = 6.0 m, H = 6.0 m y sub rasante circular de espesor de 2.0 m).

Tabla 52: Características específicas del estrato de suelo mejorado (GE-02)

Ítem	Símbolo	Nombre	Unidad	Valor
1.0	γ_{unsat}	Peso específico no saturado	$[kN/m^3]$	23.35
2.0	γ_{sat}	Peso específico saturado	$[kN/m^3]$	25.13
3.0	$E_{ref(50)}$	Módulo de Young secante (*)	$[kN/m^2]$	42,296.00
4.0	ν	Relación de Poisson (**)	$[-]$	0.35
5.0	G	Módulo de corte	$[kN/m^2]$	15.67E3
6.0	E_{oed}	Módulo edometrico	$[kN/m^2]$	67.88E3
7.0	c	Cohesión (***)	$[kN/m^2]$	0
8.0	ϕ	Ángulo de fricción interna (***)	$[^\circ]$	0
9.0	ψ	Ángulo de dilatancia (***)	$[^\circ]$	0
10.0	$S_u = C_u$	Resistencia cortante no drenada (****)	$[kN/m^2]$	498.20

3.3. Estrato de suelo CL con aditivo compactado (GE-03):

Es la capa de terreno mejorado a través de la estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme de suelos de grano fino CL, y está dado por las siguientes características generales y específicas (Ver detalle en resultados de la etapa experimental y anexo):

Tabla 53: Características generales del estrato de suelo mejorado (GE-03)

Ítem	Características	Nombre o símbolo	Descripción
1.0	Identificación	Suelo CL con aditivo compactado	Es el suelo de diseño por estabilización química más el método de combinación de suelos in situ.
2.0	Modelo de material	Mohr Coulomb	Modelo de cálculo constitutivo recomendado para este tipo de suelo (Bentley Communities, 2018).
3.0	Tipo de drenaje	Undrained (B)	Se consideró por la condición del terreno tratado y por el tipo de ensayo triaxial UU para obtener los parámetros de resistencia, según (Bentley Communities, 2018).
4.0	Tipo de suelo	Suelo de grano fino CL	Arcilla de baja plasticidad
5.0	Tipo de cimentación	Mixta	Suelo mejorado con anillo de muro de sección trapezoidal (C = 18.0 m; a = 3.0 m y H = 6.0 m) y sub rasante circular de espesor de 2.0 m; y como alternativa se evaluó la variante con anillo de sección cuadrada (A = 6.0 m, H = 6.0 m y sub rasante circular de espesor de 2.0 m).

Tabla 54: Características específicas del estrato de suelo mejorado (GE-03)

Ítem	Símbolo	Nombre	Unidad	Valor
1.0	γ_{unsat}	Peso específico no saturado	$[kN/m^3]$	18.05
2.0	γ_{sat}	Peso específico saturado	$[kN/m^3]$	21.29
3.0	$E_{ref(50)}$	Módulo de Young secante (*)	$[kN/m^2]$	21,987.00
4.0	ν	Relación de Poisson (**)	$[-]$	0.30
5.0	G	Módulo de corte	$[kN/m^2]$	8,457.00
6.0	E_{oed}	Módulo edometrico	$[kN/m^2]$	29.60E3
7.0	c	Cohesión (***)	$[kN/m^2]$	0
8.0	ϕ	Ángulo de fricción interna (***)	$[^\circ]$	0
9.0	ψ	Ángulo de dilatancia (***)	$[^\circ]$	0
10.0	$S_u = C_u$	Resistencia cortante no drenada (****)	$[kN/m^2]$	381.50

3.4. Estrato de suelo granular grueso GM con aditivo compactado (GE-04):

Es la capa de terreno mejorado a través de la estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme de suelos granulares gruesos GM, y está dado por las siguientes características generales y específicas (ver detalle en resultados de la etapa experimental y anexo):

Tabla 55: Características generales del estrato de suelo mejorado (GE-04)

Ítem	Características	Nombre o símbolo	Descripción
1.0	Identificación	Suelo GM con aditivo compactado	Es el suelo de diseño por estabilización química más el método de sustitución con material seleccionado.
2.0	Modelo de material	Mohr Coulomb	Modelo de cálculo constitutivo recomendado para este tipo de suelo (Bentley Communities, 2018).
3.0	Tipo de drenaje	Undrained (B)	Se consideró por la condición del terreno tratado y por el tipo de ensayo triaxial UU para obtener los parámetros de resistencia, según (Bentley Communities, 2018).
4.0	Tipo de suelo	Suelo granular grueso GM	Grava con limo y arena
5.0	Tipo de cimentación	Mixta	Suelo mejorado con anillo de muro de sección trapezoidal (C = 18.0 m; a = 3.0 m y H = 6.0 m) y sub rasante circular de espesor de 2.0 m; y como alternativa se evaluó la variante con anillo de sección cuadrada (A = 6.0 m, H = 6.0 m y sub rasante circular de espesor de 2.0 m).

Tabla 56: Características específicas del estrato de suelo mejorado (GE-04)

Ítem	Símbolo	Nombre	Unidad	Valor
1.0	γ_{unsat}	Peso específico no saturado	$[kN/m^3]$	23.45
2.0	γ_{sat}	Peso específico saturado	$[kN/m^3]$	24.72
3.0	$E_{ref(50)}$	Módulo de Young secante (*)	$[kN/m^2]$	49 357
4.0	ν	Relación de Poisson (**)	$[-]$	0.35
5.0	G	Módulo de corte	$[kN/m^2]$	18.28E3
6.0	E_{oed}	Módulo edometrico	$[kN/m^2]$	79.21E3
7.0	c	Cohesión (***)	$[kN/m^2]$	0
8.0	ϕ	Ángulo de fricción interna (***)	$[^\circ]$	0
9.0	ψ	Ángulo de dilatancia (***)	$[^\circ]$	0
10.0	$S_u = C_u$	Resistencia cortante no drenada (****)	$[kN/m^2]$	629.60

A.3.- Cargas: Se definió las cargas distribuidas sobre la geometría del modelo axisimétrico a partir de la carga de diseño determinada en el numeral 3.8.5.6), y se determinó según la tabla adjunta:

Tabla 57: Carga distribuida de diseño en modelo de PLAXIS 2D

Carga de diseño (Tn)	Diámetro del tanque (m)	Área de base del tanque (m^2)	Carga distribuida (Tn/m^2)	Carga distribuida (KN/m^2)
35,670.00	48.30	1,832.23	19.47	190.90
Carga distribuida de diseño =				191.00

B. Segunda etapa (Cálculo)

Se definió el enmallado de los elementos finitos, condiciones de borde, condiciones de flujo y proceso de etapas de construcción para todos los grupos de investigación, y sus respectivas variantes de la alternativa de estrato de anillo de sección trapezoidal y cuadrada de suelo mejorado.

B.1 Enmallado (mesh): Se definió un enmallado muy fino para la generación de los elementos finitos.

B.2 Condiciones de borde: Se restringieron desplazamientos horizontales (normally fixed) en los lados verticales de los lados izquierdo y derecho del eje Y; y, en el lado horizontal inferior, se restringió tanto horizontal como vertical (Fully fixed); y, finalmente, el lado superior se consideró libre (free).

B.3 Condición de flujo: Se definió el nivel freático promedio de +1.00 m.s.n.m.

B.4 Etapas constructivas: Para ello, se definieron dos procesos para cada caso:

a. Proceso sin mejora de suelo: Se definió en el orden siguiente.

- Etapa inicial: Está referido al terreno natural idealizado sin mejora de suelo.
- Etapa de carga sin mejora: Está referido a la carga de servicio de la estructura al suelo idealizado inalterado.
- Factor de seguridad sin mejora: Está referido a la falla posible en condición natural de suelo sin mejora.
- Consolidación en condición natural: Está referido al proceso de cálculo del asentamiento secundario, con la comprensibilidad, disipación de presión de poros y deformación mínima del material en su estado elástico.

b. Proceso con mejora de suelo:

- Etapa inicial: Está referido al terreno natural idealizado sin mejora de suelo.
- Etapa de excavación: Está referido al proceso de excavación para reemplazar con material estabilizado para el sistema de suelo mejorado.
- Factor de seguridad de excavación: Está referido a la falla posible en condición de suelo excavado.
- Relleno con mejora de suelo: Está referido al proceso de rellenar con proceso de la técnica de estabilización de suelos.
- Etapa de carga: Es la aplicación de la carga de servicio al terreno mejorado.
- Factor de seguridad al suelo mejorado: Es la verificación de la posible falla del nuevo sistema del terreno mejorado.
- Consolidación con mejora de suelo: Está referido al proceso de cálculo del asentamiento secundario con la comprensibilidad, disipación de presión de poros y deformación del material en su estado elástico del nuevo sistema del terreno mejorado.

B.5 Selección de puntos:

Se definieron tres puntos iguales en cada grupo de investigación, ubicados en la base de la estructura del tanque, seleccionados estratégicamente para el proceso final de cálculo, con el fin de realizar los contrastes de los asentamientos diferenciales como se describe e ilustra a continuación.

Tabla 58: Descripción de las coordenadas de los puntos de medición de desplazamientos

Nombre del punto	Coordenadas		Descripción
	X	Y	
Punto A	0.00	7.0	Es el punto ubicado en el centro del tanque.
Punto B	14.57	7.0	Es el punto ubicado a 2/3 partes del centro del tanque, en donde se registra mayor desplazamiento en los modelamientos de pre diseño.
Punto C	24.15	7.0	Es el punto ubicado en el borde de la circunferencia del tanque que referencia el desnivel con respecto al nivel del centro para determinar el asentamiento diferencial de centro a borde.

Figura 49: Ubicación de puntos en modelo de terreno sin mejora (grupo de control - GC)

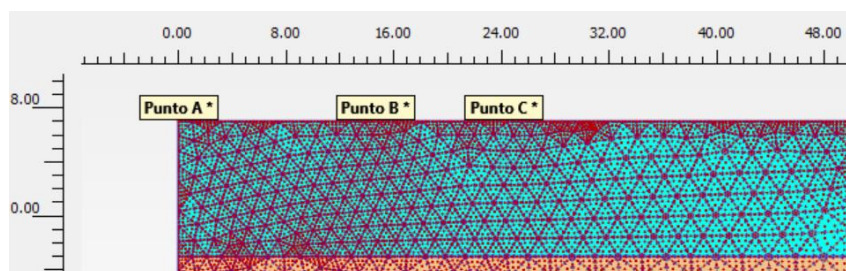


Figura 50: Ubicación de puntos en modelo de terreno con mejora de suelo (GE) con anillo de sección trapezoidal.

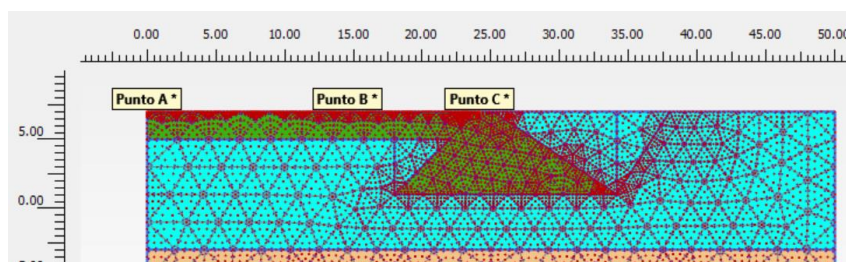
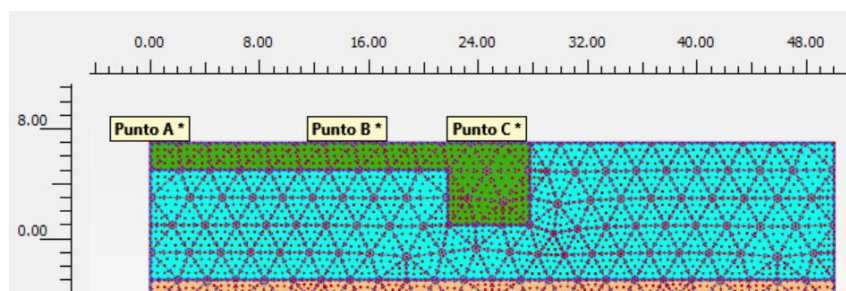


Figura 51: Ubicación de puntos en modelo de terreno con mejora de suelo (GE) con anillo de sección cuadrada.



C. Tercera etapa (Output)

La visualización de resultados de cálculo se limitó en identificar los asentamientos totales inmediatos en los puntos definidos, y luego el respectivo cálculo de los asentamientos diferenciales; y estos se exponen en los resultados de la presente (ver anexo de detalle de las gráficas de deformaciones representativas).

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados preliminares del mejoramiento de terreno

Se presentaron las conclusiones y recomendaciones de las consideraciones preliminares de la recolección de información, y la propuesta del mejoramiento del terreno en la estructura del tanque seleccionado.

4.1.1 Presentación, análisis y discusiones preliminares

4.1.1.1 Presentación y análisis preliminar

De la recopilación de información, se presenta la definición de la estructura del tanque a estudiar, el área del terreno geotécnico a mejorar y la propuesta de los detalles de la técnica de estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno descritas en el numeral 3.8.1) y 3.8.2); y, de ello, se presentan los siguientes ítems:

- a) **La estructura del tanque.** - Se eligió al “Tanque Residual” para su evaluación; pues, es el de mayor tamaño del proyecto estudiado, con un diámetro de $D_t = 48.30$ m y altura de $H_t = 19.20$ m, el cual generará la condición más crítica respecto a las otras, y demandará mayor resistencia del suelo mejorado en estudio.
- b) **El área del terreno.** - Se limitó el estudio al área focalizada de la superficie de influencia del tanque residual proyectado, el cual corresponde a un área de 12,783.22 m² y perímetro de 491.19 metros lineales.
- c) **Características del terreno.** - El suelo del terreno focalizado presenta una distribución de suelo estratificado de disposición variable y errática a nivel vertical como superficial, tal cual se detalló en el numeral 3.8.1.3), y se asumió el valor del suelo de grano fino CH, como el más crítico ubicado en la calicata C-04' para nuestro estudio.
- d) **Técnicas de mejoramiento de terreno.** - Las técnicas de estabilización de suelos, compactación con pilares cortos y vibroreemplazo (columnas de grava) resultaron adecuadas con respecto a otras en nuestro estudio, según las condicionantes intrínsecas de selección del contexto del problema; pues, fue avalada bajo el criterio de orden de prelación preestablecida de los factores como tipo de problema del terreno, tipo y tamaño de estructura, tipo de suelo y equipos e insumos; sin embargo, de los tres seleccionados, la estabilización de suelos resultó apropiada

porque las otras dos presentan incertidumbres de disponibilidad de equipos e insumos y escasa existencia de antecedentes locales para su ejecución.

e) **Métodos de estabilización.** - Para nuestro problema, prevalecieron dos recomendaciones de la norma API 650, y son:

1. Retirar el material objetable y reemplazarlo con material adecuado y compactado.
2. Estabilización del material blando por métodos químicos o inyección de lechada de cemento.

Por lo tanto, se evaluaron estos dos métodos, tipificados como mecánica y química respectivamente, tal cual (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 2015) lo clasifica.

f) **Tipos de suelos.** – Para nuestro estudio de estabilización de suelos, resultó predominante el uso de material propio y de reemplazo de las dos recomendaciones de la norma API 650; tal es así, que se diseñó el uso de material propio (combinación de suelos para la obtención de suelo equivalente homogéneo), por no ser favorables en su estado natural, y el uso del material de suelo seleccionado de préstamo. Por lo tanto, se propuso estos dos tipos suelos, que específicamente fueron el suelo de grano fino CL (material propio procesado) y suelo granular grueso GM (material seleccionado de préstamo de la cantera Gloria).

g) **Tipo de agente estabilizante.** - Para la estabilización química propicio para los suelos propuestos (suelos de grano fino CL y suelo granular grueso GM), resultaron preponderantes las experiencias favorables y especificaciones técnicas. Por lo tanto, se evaluó convenientemente el aditivo estabilizador enzimático orgánico, por las experiencias favorables con suelos arcillosos y granulares (CL, GM y GC).

h) **Producto comercial.** – El aditivo Terrazyme resultó seleccionado por los antecedentes sobresalientes, especificaciones técnicas y la certificación ISO 9002 y se utilizó en una dosificación recomendada por especificaciones técnicas y antecedentes, más no, con la dosificación optimizada para cada suelo considerado.

i) **Cantera de material de préstamo.** - La cantera “Gloria” resultó seleccionada, porque ésta cuenta con un mecanismo de extracción estandarizada y muy utilizado para distintos usos, y tiene buenas referencias del material granular grueso de base para evaluar los métodos de estabilización mecánica y química.

j) **Planteamiento de variantes de estabilización de suelos.** – Para nuestro estudio, se plantearon variantes por medio de la combinación de sus factores principales de los métodos y tipos de suelos propuestos, y que estos últimos lo conformaron por

sus antecedentes y experiencias favorables para desarrollar un tratamiento con un efecto significativo en la resistencia al corte del terreno mejorado; de los cuales se tienen los siguientes:

Tabla 59: Relación de tratamientos de mejora de suelos

Ítem	Tratamiento de mejora de terreno
1.0	Estabilización mecánica con suelo de grano fino (CL)
2.0	Estabilización mecánica con suelo granular grueso (GM)
3.0	Estabilización química con aditivo enzimático y suelo de grano fino (CL)
4.0	Estabilización química con aditivo enzimático y suelo granular grueso (GM)

4.1.1.2 Discusión preliminar

- a) Para el tipo de tanque evaluado, el uso propicio de una técnica de estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno, utilizando el filtro de criterio de importancia bajo los criterios de (Documento Básico SE-C Seguridad Estructural: Cimientos, 2019) es relativo y propio a cada problema; pues, (Maza Palop, 2020), utilizando los mismos criterios para un terreno similar al nuestro, recomendó la técnica de vibroreemplazo (columnas de grava) de acuerdo a su contexto.
- b) Con la estabilización de suelos, como técnica de mejoramiento de terreno en este tipo de estructuras, bajo las variantes de métodos mecánicos y químicos asociados a tipos de suelos de grano fino y suelos granulares gruesos con o sin aditivo, se alcanzaron parcialmente las dos recomendaciones de la norma API 650, dado que existen amplios tipos de suelos asociados a un agente estabilizante.
- c) Por las características del suelo del terreno en su estado natural descrito, no es factible su uso para ningún tratamiento; aunque el planteamiento de la obtención y uso de un suelo equivalente homogéneo sirvió con fines académicos para uniformizar su tratamiento y ser factible como método de mejora de suelos, tal cual lo sugiere (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014, pág. 98). No obstante, la técnica de estabilización por combinación de suelos es aplicada parcialmente.
- d) La posibilidad de uso del material de suelo de grano fino del lugar in situ y material seleccionado de suelo granular grueso, para este tipo de estructura proyectada, obedece a los tratamientos recomendados por la norma API 650.
- e) Con la consideración del aditivo Terrazyme, bajo referencias de sólo sus antecedentes favorables y especificaciones técnicas del producto, se alcanzó una correspondencia parcial a los suelos propuestos; pues (Ugaz Palomino, 2006) sostiene que no existe un producto químico prototipo ideal para todos los suelos.

4.2 Resultados del diseño de investigación

Se presentó el planteamiento del diseño de la investigación de acuerdo a la naturaleza de la misma para demostrar nuestra hipótesis planteada.

4.2.1 Presentación, análisis y discusiones en diseño de investigación

4.2.1.1 Presentación y análisis del diseño de investigación

Según el objetivo, se definió el tratamiento experimental y el diseño del experimento de acuerdo al numeral 3.8.3), y de ello, se presentan los siguientes ítems:

- a) **Grupos de investigación.** - Se definieron dos grupos, un grupo de control que sirvió como línea de base y un grupo experimental al que se le aplicó el tratamiento experimental, y que se generó por la manipulación de sus modalidades de los factores de la variable independiente (métodos de estabilización y tipos de suelos), para causar un efecto sobre la variable dependiente (mejoramiento de terreno).

Tabla 60: Relación de los grupos de investigación

Grupo	Causa (variable independiente)	Símbolo
1.- Grupo de control	1.1.- Terreno sin tratamiento	GC
2.- Grupo experimental	2.1. Terreno con tratamiento de método de estabilización mecánica y tipo de suelo de grano fino CL	GE-01
	2.2. Terreno con tratamiento de método de estabilización mecánica y tipo de suelo granular grueso GM	GE-02
	2.3. Terreno con tratamiento de método de estabilización química con aditivo enzimático y tipo de suelo de grano fino CL	GE-03
	2.4. Terreno con tratamiento de método de estabilización química con aditivo enzimático y tipo de suelo granular grueso GM	GE-04

- b) **Diseño de tratamiento experimental.** – Las variantes de la estabilización de suelos son producto de la combinación de los factores que la conforman con sus respectivas categorías, y, de ello, se definió un diseño factorial 2x2 para cada variable de respuesta $(S_w, C, \emptyset)_{ij}$ del mejoramiento de terreno, y quedó definido de la siguiente manera:

Tabla 61: Diseño factorial 2x2 definido

		Factor A: Métodos de estabilización			
		Mecánica (-)		Química (+)	
Factor B: Tipos de suelos	Suelo GM (+)	Réplica N° 01	Réplica N° 02	Réplica N° 01	Réplica N° 02
		$(S_w, C, \emptyset)_{ij}$	$(S_w, C, \emptyset)_{ij}$	$(S_w, C, \emptyset)_{ij}$	$(S_w, C, \emptyset)_{ij}$
	Suelo CL (-)	Réplica N° 01	Réplica N° 02	Réplica N° 01	Réplica N° 02
		$(S_w, C, \emptyset)_{ij}$	$(S_w, C, \emptyset)_{ij}$	$(S_w, C, \emptyset)_{ij}$	$(S_w, C, \emptyset)_{ij}$

- c) **Diseño del experimento.**- Se desarrolló según al objetivo del estudio, con dos réplicas de pruebas triaxiales UU para las cuatro combinaciones (04 tratamientos), con el fin de medir las variables de respuesta de la resistencia al corte ($S_u = C_u$), y sus parámetros de resistencia de la cohesión “C” y ángulo de fricción “ ϕ ” en el mejoramiento de terreno, en un diseño totalmente aleatorio y de esta manera desarrollar un tratamiento que presente efectos significativos.

4.2.1.2 Discusiones del diseño de investigación

- a) La consideración de medición del grupo de control (terreno sin tratamiento) forma parte de uno de los requisitos de los grupos de comparación (manipulación de la variable independiente) para una investigación experimental, tal como lo sugiere (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 141).
- b) (Kuehl, 2001, pág. 175), afirma que “los diseños factoriales producen experimentos más eficientes, pues cada observación proporciona información sobre todos los factores, y es factible ver las respuestas de un factor en diferentes niveles de otro factor en el mismo experimento”. Por lo tanto, la influencia de los factores de la estabilización de suelos propuestos quedará expuesta con mayor claridad en el mejoramiento de terreno del presente estudio.

4.3 Resultados de ensayos de mecánica de suelos

Se realizó en tres etapas de la investigación (descritas en el numeral 3.8.4).

4.3.1 Presentación, análisis y discusiones de EMS en etapa preliminar

4.3.1.1 Presentación y análisis de EMS en etapa preliminar

En esta etapa, se realizaron los EMS al material propio (suelo equivalente homogéneo) para el uso en la estabilización mecánica y química de acuerdo a las consideraciones de los numerales 3.8.1.6) y del literal a.1) del numeral 3.8.2.3); y de ello, se tienen los siguientes ítems:

- a) La extracción de estos materiales, para la combinación y la obtención del material de suelo equivalente homogéneo, resultó de los remanentes de las muestras de las calicatas de los puntos de interés del estudio geotécnico de la UNALM.
- b) La alternativa de uso de material propio, suelo equivalente mezclado de las calicatas (C-03, C-04, C-06 y C-7) a una profundidad ($h = 1.50 \text{ m} - 2.50 \text{ m}$) de la zona de influencia de la estructura proyectada, resultó ser un suelo de grano fino CL, como se detalló en el numeral 3.8.1.6) y presenta las siguientes características en la tabla adjunta.

Tabla 62: Propiedades índice de suelo equivalente mezclado

Propiedades	Unid.	Suelo mezclado
Profundidad	m	1.50 - 2.50
Plasticidad		
Límite líquido	LL(%)	46.40
Límite plástico	LP(%)	18.97
Índice de plasticidad	IP (%)	27.43
Humedad natural	W (%)	-
Densidad natural	γ (gr/cc)	-
Densidad suelo seco	γ_d (gr/cc)	1.59
Densidad seca máxima	D.S.M. (gr/cc)	1.85
Humedad óptima	Wop (%)	15.70
Clasificación	SUCS	CL con arena

4.3.1.2 Discusión de EMS en etapa preliminar

- La mezcla de suelos sirve como material de estabilización, sólo y siempre en cuando el resultado de la misma sea idóneo para su tratamiento; tal cual (Ravines Merino, 2010) evidenció el uso del suelo de grano fino CL con buenos resultados, producto de la mezcla de suelos para ser estabilizada químicamente.
- La posibilidad de uso del material de suelo de grano fino CL del lugar, para este tipo de estructura proyectada, obedece al tratamiento establecido por la norma API 650; el cual afirma “la estabilización del material blando por métodos químicos o inyección de lechada de cemento” (American Petroleum Institute, 2012).

4.3.2 Presentación, análisis y discusiones de EMS en etapa exploratoria

4.3.2.1 Presentación y análisis de EMS en etapa exploratoria

En esta etapa, se realizaron EMS descritos en el numeral 3.8.4.1) y en el inciso 2) del numeral 3.8.4.2) para la verificación del estrato de suelo crítico “CH” del terreno (grupo de control de la investigación); de los cuales, se presenta un análisis general y focalizado en los ensayos triaxiales por ser objeto de la investigación en los siguientes ítems:

- La verificación de las propiedades del suelo crítico “CH” de la calicata C - 04 del EMS del estudio geotécnico de la UNALM, a través de la calicata denominada C - 04', presenta diferencias notables en sus propiedades (véase tabla adjunta y anexo de EMS).
- De todos los ensayos de los EMS, se tiene que sólo para los ensayos de compresión triaxial se realizaron dos réplicas como parte del requisito de diseño del experimento de arreglo factorial (descrito en el numeral 3.8.3.4).

- c) Los ensayos triaxiales de verificación se realizaron con densidades de campo, bajo esfuerzos de confinamiento de $\sigma_3 = 0.5, 1 \text{ y } 2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$, diferentes al informe geotécnico de la UNALM, de $\sigma_3 = 1, 2 \text{ y } 4 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$, los cuales, estos últimos fueron modificados a esfuerzos inferiores debido al salvaguardo de los equipos de ensayos triaxiales, pues los especímenes de los grupos experimentales presentaron esfuerzos de resistencia muy elevados.

Tabla 63: Verificación de propiedades geotécnicas de suelo crítico.

		Estudio geotécnico UNALM		Estudio de verificación (tesis)	
Propiedades	Unid.	C - 04		C - 04'	
Profundidad	m	1.0 – 1.50	1.50 - 2.50	1.0 – 1.50	1.50- 2.50
Plasticidad					
Límite líquido	LL(%)	32	63	34.40	44.80
Límite plástico	LP(%)	28	28	22.08	23.45
Índice de plasticidad	IP (%)	3	35	12.32	21.35
Humedad natural	W (%)	14.26	23.15	13.08	26.94
Densidad natural	$\gamma(\text{gr/cc})$	1.49	1.38	1.49	1.75
Densidad suelo seco	$\gamma_d(\text{gr/cc})$	1.31	1.08	1.32	1.35
Cohesión aparente	(C) Kg/cm ²	-	0.44	0.45	0.33
Ángulo de fricción interna	ϕ (°)	-	13.50	21.02	6.34
Densidad seca máxima (D.S.M.)	(gr/cc)	-		-	
Humedad óptima	W _{op} (%)	-		-	
C.B.R. al 95 %	%	-	-	-	-
C.B.R. al 100 %	%	-	-	-	-
Clasificación	SUCS	ML	CH	CL	CH

- d) Uno de los causales de variación en los parámetros de resistencia en la verificación, sería por la modificación de los esfuerzos de confinamiento en los ensayos.
- e) De los ensayos triaxiales con dos réplicas, se tienen ligeras variaciones de éstos en la resistencia al corte y los parámetros de resistencia, que son propias del comportamiento de cada espécimen y la manipulación en cada uno de ellos.
- f) Según gráficas de esfuerzo desviador vs deformación unitaria para ambas pruebas, se presenta una deformación no lineal elástica; pues, el espécimen registra un reacomodo de las partículas y endurecimiento dentro del rango plástico.
- g) De las gráficas de esfuerzo desviador vs deformación unitaria y esfuerzo cortante vs esfuerzo normal de los ensayos triaxiales UU, se determinó el módulo elástico secante E_{50} (E_u) y la resistencia al corte no drenada S_u (C_u) respectivamente para el suelo de grano fino CH (suelo crítico - GC), tal cual se muestra en la tabla adjunta.

Tabla 64: Parámetros elásticos y de resistencia al corte de suelo de grano fino CH (calicata C-04')

Factores o Sub variables		Ensayo triaxial UU: Espécimen remoldado			
		Grupo (GC): Suelo CH (h = 2.50 m)			
		Réplica N°01	Réplica N°02	Parcial	Total
Propiedades	Unid.				
Módulo de elasticidad (E_{50})	Kg/cm ²				51.50
$E_{50} (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm ²	40.00	42.00	41.00	
$E_{50} (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm ²	55.00	54.00	54.50	
$E_{50} (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm ²	60.00	58.00	59.00	
Resistencia al corte S_u	Kg/cm ²				0.50
$C_u (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm ²	0.42	0.42	0.42	
$C_u (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm ²	0.50	0.49	0.50	
$C_u (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm ²	0.60	0.56	0.58	
Clasificación	SUCS	CH	CH		

4.3.2.2 Discusión de EMS en etapa exploratoria

- La verificación de propiedades geotécnicas de interés, se realizó para generar una equivalencia entre el grupo de control y el grupo experimental y de esta manera cumplir con los requisitos de diseño experimental.
- En esta etapa, se limitó a la verificación de las características del suelo crítico "CH" (grupo de control) en la calicata C-04 del informe geotécnico de la UNALM con la calicata C-04', por los criterios de diseño (descritos en numeral 3.8.3.1).
- La modificación descendente de los esfuerzos de confinamiento en las pruebas triaxiales de verificación, con respecto al estudio geotécnico de la UNALM, está sujeta a criterios de contingencia de salvaguardo de los equipos utilizados; pues, el tratamiento GM (GE-04) demandó mayor resistencia de la estabilidad del anillo de carga del equipo triaxial utilizado con respecto a los demás. Por lo tanto, se uniformizó a esfuerzos inferiores para todos los grupos de investigación (GC y GE).
- Los ensayos triaxiales se realizaron bajo los mismos esfuerzos de confinamiento de $\sigma_3 = 0.5, 1 \text{ y } 2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ para los dos grupos de investigación (GC y GE); y así cumplir con los dos requisitos: grupos de comparación y equivalencia de grupos para lograr el control y la validez interna de la investigación, tal cual así lo sostiene (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 141).
- La principal causa de las diferencias de las propiedades geotécnicas verificadas, entre calicatas C-04 y C-04', está dado por el efecto de capilaridad del agua del nivel freático que incide en la humedad del estrato cercano a éste, ya que la exploración de cada uno de ellos se realizó en distintos tiempos, dado que el primero fue realizado en época de estiaje y el segundo en época de máxima avenida

del río Chillón, puesto que existe una diferencia significativa en la humedad de ambas calicatas, y por ende repercute en sus demás parámetros de resistencia.

- f) Con los ensayos triaxiales UU remoldadas con densidades de campo de calicata C-04' (02 réplicas), del estrato crítico del suelo de grano fino CH ($h = 2.50$ m) y del estrato de suelo CL ($h = 1.50$ m), se alcanzó identificar modos de falla por abultamiento respectivamente según (Das & Sobhan, Principles of Geotechnical Engineering, 2018, pág. 510), o denominado también como falla por flexibilidad plástica o en barril según (Whitlow, 1994); como se llega a apreciar en las vistas fotográficas siguientes:

Figura 52: Especímenes de suelo de grano fino CH (suelo crítico – GC), fallados por abultamiento



Figura 53: Especímenes de suelo de grano fino CL (C-04'), fallados por abultamiento



- g) Las diferencias en valores de los parámetros de resistencia al corte sin drenaje del mismo suelo siempre variarán, debido a que éste representa un comportamiento y no así una propiedad típica del suelo y depende del método de prueba y del estado en que se encuentra la muestra (Bowles J. E., 1997, pág. 103).

4.3.3 Presentación, análisis y discusiones de EMS en etapa experimental

4.3.3.1 Presentación y análisis de EMS en etapa experimental

Se presentan los resultados de EMS bajo las consideraciones de los numerales 3.8.4.1), del inciso 3) del numeral 3.8.4.2) y 3.8.3), y de ello, se presenta un análisis general y focalizado de los ensayos triaxiales por ser objeto de la investigación en los siguientes ítems:

- a) Los cuatro grupos experimentales (GE) presentan diferencias notables en los valores de las propiedades geotécnicas (véase tabla adjunta y anexo de EMS).

Tabla 65: Propiedades geotécnicas de los grupos experimentales (GE).

Tratamiento experimental		Estabilización de suelos			
Factores o sub variables		Estabilización mecánica		Estabilización química	
		Suelo CL	Suelo GM	Suelo CL	Suelo GM
Grupo experimental		GE - 01	GE - 02	GE - 03	GE - 04
Propiedades	Unid.				
Profundidad	m	1.0 – 1.50	-	1.0 – 1.50	-
Plasticidad					
Limite liquido	LL(%)	34.40	19.90	33.60	18.53
Limite plástico	LP(%)	22.08	16.92	22.61	16.66
Índice de plasticidad	IP (%)	12.32	2.98	10.99	1.87
Humedad natural	W (%)	14.26	2.57	13.08	2.57
Densidad natural	γ (gr/cc)	1.49	-	1.49	-
Densidad suelo seco	γ_d (gr/cc)	1.31	-	1.32	-
Cohesión aparente (C)	Kg/cm ²	1.68	1.03	1.53	1.05
Ángulo de fricción interna	ϕ (°)	25.31	44.14	29.95	49.11
Densidad seca máxima(D.S.M.)	(gr/cc)	1.84	2.38	1.84	2.39
Humedad óptima	Wop (%)	15.65	5.30	16.20	4.60
C.B.R. al 95 %	%	15	70	17	67
C.B.R. al 100 %	%	20	127	22	158
Clasificación	SUCS	CL	GM	CL	GM

(*) Los valores de " ϕ " y "C", representan la media de las réplicas de cada una de ellas.

- b) Los índices de plasticidad de los suelos de grano fino CL y suelos granulares gruesos GM presentan diferencias sustanciales, propias en este tipo de suelos.
- c) En la estabilización química, los índices plásticos variaron ligeramente, tanto, en el límite líquido como el plástico en ambos tipos de suelos.
- d) En el ensayo de CBR, se aprecia que los métodos de estabilización mecánica y química asociados con un suelo de grano fino CL presenta ligeros incrementos;

mientras que con un suelo granular grueso GM registra incrementos notables de CBR de hasta un 158% perteneciente al grupo experimental (GE-04).

- e) Los ensayos triaxiales UU, comprendieron dos (02) réplicas de tres probetas remoldadas con densidad seca máxima (DSM) y esfuerzos de confinamiento de $\sigma_3 = 0.5, 1$ y $2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ para cada grupo (véase anexo de ensayos triaxiales).
- f) Los grupos de control (GC) y experimental (GE), presentan diferencias muy marcadas en sus propiedades geotécnicas, como se muestra en la tabla adjunta.

Tabla 66: Cuadro comparativo de propiedades de los grupos de investigación (GE y GC)

Propiedades geotécnicas	Grupos experimentales: (Grupo de Control (GC) y Grupo experimental (GE))				
	GC	GE-01	GE-02	GE-03	GE-04
	Suelo de grano fino CH (crítico)	Suelo de grano fino CL	Suelo granular grueso GM	Suelo de grano fino c/. Aditivo	Suelo granular grueso GM c/. Aditivo
	Sin estabilización	Estabilización mecánica	Estabilización mecánica	Estabilización química	Estabilización química
Cohesión	0.33	1.68	1.03	1.53	1.05
Angulo de Fricción Interna (°)	6.34	25.31	44.14	29.95	49.11
Densidad seca (gr/cm3)	1.35	1.84	2.38	1.84	2.39
Contenido de Humedad (%)	26.94	15.65	5.30	16.20	4.60

- g) Los grupos experimentales (GE) presentan incrementos de la cohesión, ángulo de fricción y densidad seca con respecto al grupo de control (GC) del suelo crítico "CH". Sin embargo, con respecto al contenido de humedad, el efecto es inverso, es decir, presenta un decremento con el tratamiento de la estabilización de suelos.
- h) De las gráficas del esfuerzo desviador vs deformación unitaria y esfuerzo cortante vs esfuerzo normal de los ensayos triaxiales UU, se determinó el módulo elástico secante E_{50} (Eu) y la resistencia al corte no drenada S_u (Cu), respectivamente, y están dadas en las siguientes tablas:

Tabla 67: Parámetros elásticos y de resistencia al corte del grupo experimental GE-01

Factores o Sub variables		Ensayo triaxial UU: Espécimen remoldado			
		Grupo (GE-01): Suelo de grano fino CL			
		Réplica N°01	Réplica N°02	Parcial	Total
Propiedades	Unid.				
Módulo de Elasticidad (E_{50})	Kg/cm2				223.33
$E_{50} (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	165.00	280.00	222.50	
$E_{50} (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	180.00	220.00	200.00	
$E_{50} (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	225.00	270.00	247.50	
Resistencia al corte S_u	Kg/cm2				3.55
$C_u (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	2.65	3.25	2.95	
$C_u (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	3.00	3.65	3.33	
$C_u (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	4.40	4.35	4.37	

Tabla 68: Parámetros elásticos y de resistencia al corte del grupo experimental GE-02

Factores o Sub variables		Ensayo triaxial UU: Espécimen remoldado a DSM			
		Grupo (GE-02): Suelo granular grueso GM			
		Réplica N°01	Réplica N°02	Parcial	Total
Propiedades	Unid.				
Módulo de Elasticidad (E_{50})	Kg/cm2				431.25
$E_{50} (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	360.00	300.00	330.00	
$E_{50} (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	560.00	375.00	467.50	
$E_{50} (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	517.50	475.00	496.25	
Resistencia al corte S_u	Kg/cm2				5.08
$C_u (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	3.60	3.45	3.53	
$C_u (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	4.80	4.70	4.75	
$C_u (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	7.05	6.85	6.95	

Tabla 69: Parámetros elásticos y de resistencia al corte del grupo experimental GE-03

Factores o Sub variables		Ensayo triaxial UU: Espécimen remoldado a DSM			
		Grupo (GE-03): Suelo de grano fino CL con aditivo			
		Réplica N°01	Réplica N°02	Parcial	Total
Propiedades	Unid.				
Módulo de Elasticidad (E_{50})	Kg/cm2				224.17
$E_{50} (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	170.00	180.00	175.00	
$E_{50} (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	225.00	235.00	230.00	
$E_{50} (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	260.00	275.00	267.50	
Resistencia al corte S_u	Kg/cm2				3.89
$C_u (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	3.00	3.20	3.10	
$C_u (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	3.85	3.97	3.91	
$C_u (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	4.60	4.70	4.65	

Tabla 70: Parámetros elásticos y de resistencia al corte del grupo experimental GE-04

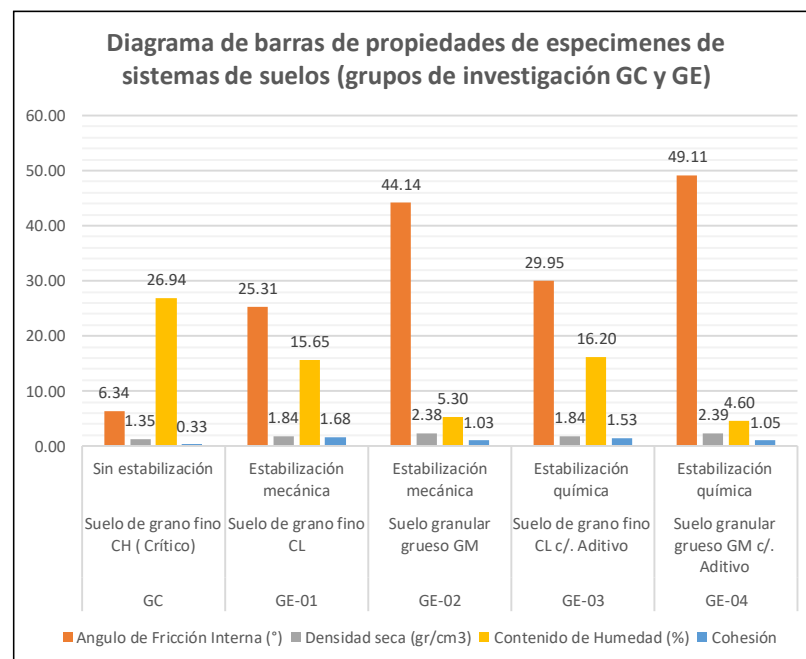
Factores o Sub variables		Ensayo triaxial UU: Espécimen remoldado			
		Grupo (GE-04): Suelo granular grueso GM con aditivo			
		Réplica N°01	Réplica N°02	Parcial	Total
Propiedades	Unid.				
Módulo de Elasticidad (E_{50})	Kg/cm2				503.33
$E_{50} (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	400.00	540.00	470.00	
$E_{50} (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	560.00	570.00	565.00	
$E_{50} (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	475.00	475.00	475.00	
Resistencia al corte S_u	Kg/cm2				6.42
$C_u (\sigma_3 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	4.30	4.30	4.30	
$C_u (\sigma_3 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	5.90	5.95	5.93	
$C_u (\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg/cm}^2)$	Kg/cm2	8.90	9.15	9.03	

- i) En los grupos experimentales, las propiedades de módulo elástico secante E_{50} (Eu) y la resistencia al corte no drenada S_u (Cu) tuvieron incrementos ascendentes en cada uno de ellos, y, especialmente con mayor significancia, el tratamiento del método de estabilización química con un aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM (GE-04), tal cual se aprecia de las tablas adjuntas.

4.3.3.2 Discusión de EMS en etapa experimental

- a) Los cuatro tratamientos experimentales (GE) alcanzaron notables y muy diferenciados efectos de alteraciones de incremento y decremento en sus propiedades geotécnicas en la mejora de suelos sobre el suelo crítico “CH” (GC).
- b) Con los métodos de estabilización (mecánica y química) asociados a un tipo de suelo (suelo de grano fino CL y suelo granular grueso GM), se alcanzó alterar significativamente las propiedades de resistencia como la cohesión, ángulo de fricción interna y densidad; y, a su vez, se disminuyó el contenido de humedad.
- c) Con la simulación de variantes de las categorías de los factores de métodos de estabilización y tipos de suelos para el mejoramiento a través de grupos experimentales, se logró el objetivo principal de determinar los efectos de éstos; es decir, modificar favorablemente las propiedades competentes del ángulo de fricción interna del suelo “ ϕ ”, cohesión “ c ” y densidad “ ρ ” para el aumento de la capacidad de carga del suelo en el terreno, tal cual lo sostiene (Bowles J. E., 1997, pág. 344), como se aprecia en el diagrama adjunto.

Figura 54: Diagrama de propiedades geotécnicas del grupo de control y experimental.



- d) Del diagrama anterior, se aprecian diferencias notables entre el método de estabilización química y la mecánica, dado que el aditivo generó efectos ligeros de reducción en la cohesión en un 8.93% en el tipo de suelo de grano fino CL y un incremento mínimo en la cohesión de 1.94% en el tipo de suelo granular grueso GM; asimismo, presenta un incremento notable en el ángulo de fricción en un 18.33% en el tipo de suelo de grano fino CL, y un ligero incremento de 11.26 % en el tipo de suelo granular grueso GM.
- e) La estabilización mecánica con un suelo de grano fino CL (GE-01) logró incrementar la resistencia al corte, reflejándose en el aumento del ángulo de fricción y la cohesión en un 299.21% y 212.12% respectivamente con respecto al suelo crítico "CH" (GC).
- f) La estabilización mecánica con un suelo granular grueso GM (GE-02) logró incrementar notablemente la resistencia al corte, reflejándose a través del aumento en el ángulo de fricción y la cohesión en un 596.21% y 212.12% respectivamente con respecto al suelo crítico "CH" (GC).
- g) El método de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo de grano fino CL (GE-03), logró aumentar notablemente la resistencia al corte, por medio del ángulo de fricción y la cohesión, que alcanzaron un 372.40% y 363.64% respectivamente con respecto al suelo crítico "CH" (GC).
- h) El método de estabilización química con un aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM (GE-04), logró aumentar la resistencia al corte de forma muy significativa con respecto a los demás; y, por ende, los parámetros de resistencia como el ángulo de fricción alcanzaron incrementar en un 674.61% y en un 218.18% la cohesión con respecto al suelo crítico "CH" (GC).
- i) En el tratamiento del método de estabilización mecánica con un tipo de suelo de grano fino CL (GE-01), se identificó en los ensayos de medición de la resistencia al corte (prueba triaxial UU), tres modos de fallas según (Whitlow, 1994) como se aprecia en la figura adjunta y se describen como: (a) falla frágil por corte para $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$, en lado derecho, (b) falla parcial por corte para $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$, en el centro, y (c) falla de flexibilidad plástica o de barril para $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$, en el lado izquierdo de la figura; asimismo, de otro lado las fallas también se pueden caracterizarlo según (Das & Sobhan, Principles of Geotechnical Engineering, 2018, pág. 510) en dos fallas: (a) falla por corte para $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$ en probeta de lado derecho de la figura y (b) falla por abultamiento para $\sigma_3 = 0.5 \text{ y } 1.0 \text{ kg/cm}^2$ para las dos primeras probetas de lado izquierdo de la vista fotográfica.

Figura 55: Probetas de ensayo triaxial UU (GE-01) con tres tipos de modo de falla para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2 kg/cm^2 en ese orden de izquierda a derecha de la figura.



- j) Del mismo modo, con el tratamiento del método de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo de grano fino CL (GE-03), se identificó el modo de falla por corte para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2.0 kg/cm^2 en todos los testigos de los ensayos triaxiales UU, como se aprecia en la vista fotográfica.

Figura 56: Probetas de ensayo triaxial UU (GE-03) con modo de falla por corte para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2 kg/cm^2 en ese orden de izquierda a derecha de la figura.



- k) De otro lado, en el tratamiento del método de estabilización mecánica con un tipo de suelo granular grueso GM (GE-02), y el tratamiento del método de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM (GE-04), se identificaron modos de falla por corte para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2.0 kg/cm^2 en todos los testigos de los ensayos triaxiales UU, como se ilustra en las vistas fotográficas.

Figura 57: Probetas de ensayo triaxial UU (GE-02) con modo de falla por corte para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2 kg/cm^2 en ese orden de izquierda a derecha de la figura.



Figura 58: Probetas de ensayo triaxial UU (GE-04) con modo de falla por corte para $\sigma_3 = 0.5, 1.0$ y 2 kg/cm^2 en ese orden de izquierda a derecha de la figura.



- l) De la resistencia al corte (S_u) y el módulo secante de Young (E_{50}), se puede resaltar que las variantes de los tratamientos de los métodos de estabilización (mecánica y química) y los tipos de suelos (suelo de grano fino CL y suelo granular grueso GM) con o sin aditivo enzimático Terrazyme incrementan ascendentemente, en especial el método químico y suelo granular grueso GM con aditivo enzimático Terrazyme (GE-04) con resultados sobresalientes.

4.4 Resultados de cálculo de asentamientos

4.4.1 Presentación, análisis y discusión del cálculo de asentamientos

4.4.1.1 Presentación y análisis

Los resultados son producto de las consideraciones descritas en el numeral 3.8.6), y se determinaron los asientos inmediatos para los grupos de investigación (GC y GE)

como complemento a los objetivos principales de la investigación; sin ser menos importante el cálculo de éstos en el diseño de cimentaciones. Y, de ello, se tiene:

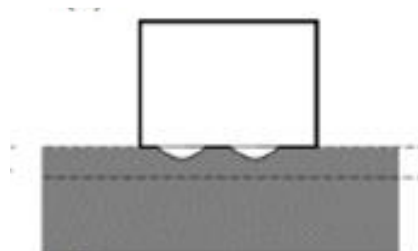
- a) **Asientos permisibles.** – Se presentan los asientos totales y diferenciales según diversos criterios de normas y autores, y, para nuestro caso, se asumió evaluar el más conservador dada por la norma API 625 como se aprecia en la tabla adjunta:

Tabla 71: Asentamiento total permisible determinado a partir del asiento diferencial

Según norma y/o autor	Asentamiento diferencial (m) para $D_t = 48.30$ m	Asentamiento total " ΔH " (m) según Bowles ($\delta = \frac{3}{4}\Delta H$)
Akhavan - Zanjani	0.333	0.444
Norma DIN 4119	0.966	1.288
Janesse Fire Defense Agency	0.483	0.644
PIP STE03020 (asentamiento de centro a borde: $D_t/50 @ D_t/100$)	0.644	0.857
API 625	0.101	0.135
EEMUA 159 ($D_t = 50$ m)	1.000	1.333

- b) **Tipo de asientos.** – Se determinó con el programa PLAXIS 2D, sólo el tipo inmediato, según la naturaleza de nuestros datos, pues los asientos por consolidación son poco realistas en modelos de condición "No" drenada B.
- c) **Modo de asiento.** - Con la modelación en PLAXIS 2D para un contorno de dos veces el radio de la estructura, el modo de asentamiento presentó deformaciones focalizadas de configuración peculiar como se aprecia en la figura (véase anexo de forma representativa de los modelos del grupo de control GC y del grupo experimental GE-04).

Figura 59: Modo de asentamiento de fondo focalizado



Fuente: (Thusyanthan & Enriquez, 2022)

- d) **Resultado de asientos.** – Del modelamiento, se presenta los asentamientos totales con su respectivo cálculo de los asientos diferenciales predefinidos en los puntos de interés para los diferentes grupos de investigación bajo las consideraciones del numeral 3.8.6), y se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 72: Asientos del modelo de terreno sin mejoramiento de suelo.

		Asiento total (m)	Asiento total permisible (m)	Condición de asiento total permisible	Asientos en puntos (m)			Asientos de centro a borde (m)	Asientos entre puntos estratégicos (m)		Asiento diferencial permisible (m)	Condición de asiento diferencial
Ítem	Grupos	Uy	Uadm	Condición	Ua	Ub	Uc	Ua-Uc	Ua-Ub	Ub-Uc	U dif adm	Condición
01	Grupo de control GC	0.172	0.135	No cumple	0.123	0.161	0.059	0.064	0.038	0.102	0.101	No cumple

Tabla 73: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección trapezoidal ($C=18m, a=3m, H=6m$ y $e=2m$ subrasante)

		Asiento total (m)	Asiento total permisible (m)	Condición de asiento total permisible	Asientos en puntos (m)			Asientos de centro a borde (m)	Asientos entre puntos estratégicos (m)		Asiento diferencial permisible (m)	Condición de asiento diferencial
Ítem	Grupos	Uy	Uadm	Condición	Ua	Ub	Uc	Ua-Uc	Ua-Ub	Ub-Uc	U dif adm	Condición
01	Grupo GE-01	0.134	0.135	Si cumple	0.104	0.134	0.050	0.054	0.030	0.084	0.101	Si cumple
02	Grupo GE-02	0.124	0.135	Si cumple	0.095	0.124	0.049	0.046	0.029	0.075	0.101	Si cumple
03	Grupo GE-03	0.136	0.135	No cumple	0.104	0.136	0.050	0.054	0.032	0.086	0.101	Si cumple
04	Grupo GE-04	0.120	0.135	Si cumple	0.094	0.120	0.048	0.046	0.026	0.072	0.101	Si cumple

Tabla 74: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección trapezoidal ($C=13m, a=3m, H=4m$ y $e=2m$ subrasante)

		Asiento total (m)	Asiento total permisible (m)	Condición de asiento total permisible	Asientos en puntos (m)			Asientos de centro a borde (m)	Asientos entre puntos estratégicos (m)		Asiento diferencial permisible (m)	Condición de asiento diferencial
Ítem	Grupos	Uy	Uadm	Condición	Ua	Ub	Uc	Ua-Uc	Ua-Ub	Ub-Uc	U dif adm	Condición
01	Grupo GE-01	0.148	0.135	No cumple	0.106	0.143	0.054	0.052	0.037	0.089	0.101	Si cumple
02	Grupo GE-02	0.138	0.135	No cumple	0.097	0.134	0.053	0.044	0.037	0.081	0.101	Si cumple
03	Grupo GE-03	0.148	0.135	No cumple	0.106	0.143	0.054	0.052	0.037	0.089	0.101	Si cumple
04	Grupo GE-04	0.135	0.135	No cumple	0.095	0.131	0.053	0.042	0.036	0.078	0.101	Si cumple

Tabla 75: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección cuadrada ($A=6m, H=6m$ y $e=2m$ subrasante)

		Asiento total (m)	Asiento total permisible (m)	Condición de asiento total permisible	Asientos en puntos (m)			Asientos de centro a borde (m)	Asientos entre puntos estratégicos (m)		Asiento diferencial permisible (m)	Condición de asiento diferencial
Ítem	Grupos	Uy	Uadm	Condición	Ua	Ub	Uc	Ua-Uc	Ua-Ub	Ub-Uc	U dif adm	Condición
01	Grupo GE-01	0.149	0.135	No cumple	0.105	0.144	0.053	0.052	0.039	0.091	0.101	Si cumple
02	Grupo GE-02	0.138	0.135	No cumple	0.095	0.133	0.054	0.041	0.038	0.079	0.101	Si cumple
03	Grupo GE-03	0.149	0.135	No cumple	0.105	0.144	0.053	0.052	0.039	0.091	0.101	Si cumple
04	Grupo GE-04	0.133	0.135	Si cumple	0.093	0.130	0.053	0.040	0.037	0.077	0.101	Si cumple

Tabla 76: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección cuadrada ($A=4m, H=4m$ y $e=2m$ subrasante)

		Asiento total (m)	Asiento total permisible (m)	Condición de asiento total permisible	Asientos en puntos (m)			Asientos de centro a borde (m)	Asientos entre puntos estratégicos (m)		Asiento diferencial permisible (m)	Condición de asiento diferencial
Ítem	Grupos	Uy	Uadm	Condición	Ua	Ub	Uc	Ua-Uc	Ua-Ub	Ub-Uc	U dif adm	Condición
01	Grupo GE-01	0.153	0.135	No cumple	0.108	0.146	0.055	0.053	0.038	0.091	0.101	Si cumple
02	Grupo GE-02	0.145	0.135	No cumple	0.097	0.139	0.054	0.043	0.042	0.085	0.101	Si cumple
03	Grupo GE-03	0.154	0.135	No cumple	0.107	0.147	0.055	0.052	0.040	0.092	0.101	Si cumple
04	Grupo GE-04	0.142	0.135	No cumple	0.095	0.136	0.054	0.041	0.041	0.082	0.101	Si cumple

Tabla 77: Asientos del modelo de terreno con mejoramiento de suelo con muro de anillo de sección trapezoidal ($C=14.25m, a=3m, H=4.50m$ y $e=2m$ subrasante)

		Asiento total (m)	Asiento total permisible (m)	Condición de asiento total permisible	Asientos en puntos (m)			Asientos de centro a borde (m)	Asientos entre puntos estratégicos (m)		Asiento diferencial permisible (m)	Condición de asiento diferencial
Ítem	Grupo	Uy	Uadm	Condición	Ua	Ub	Uc	Ua-Uc	Ua-Ub	Ub-Uc	U dif adm	Condición
01	Grupo GE-04	0.131	0.135	Si cumple	0.094	0.129	0.052	0.042	0.035	0.077	0.101	Si cumple

4.4.1.2 Discusión de resultados en asentamientos

- a) El criterio de la norma API 625 es la más conservadora que garantiza el buen funcionamiento y calidad del servicio de la estructura proyectada.
- b) Se alcanzó evidenciar que no sólo en el centro y en el borde se presentan máximos valores de desplazamiento, sino que, por la estratigrafía del terreno, presentó un modo de asiento focalizado (Thusyanthan & Enriquez, 2022).
- c) El valor del asiento diferencial para el terreno idealizado sin tratamiento es poco realista; pues, en su condición errática y variable horizontal y verticalmente de suelo estratificado, daría resultados superiores.
- d) Solo el tratamiento GE-04 cumple con los asientos totales permisibles en las dos alternativas de anillo de cimentación cuadrada y trapezoidal para $H = 6$ m.
- e) Se cumple con los límites de asientos diferenciales para todos los grupos experimentales en las dos alternativas de cimient, porque todos subyacen homogéneamente en estratos idealizados bajo cargas uniformes del tanque.
- f) La sección de anillo trapezoidal recomendada por la norma API 650 es la que mejor performance tiene con respecto a la cuadrada, y logra cumplir con los asientos permisibles hasta una altura $H = 4.50$ m para el tratamiento GE-04.
- g) El tratamiento del grupo experimental GE-04 alcanzó mejores resultados de disminución de asientos con respecto a los demás.

4.5 Resultados del análisis de datos de la investigación

Bajo las consideraciones descritas en el numeral 3.8.3), con los valores obtenidos en el numeral 4.3); se procesó en el programa Excel y Minitab con las herramientas de la estadística descriptiva e inferencial para comprobar las hipótesis. Del cual se tiene:

4.5.1 Presentación, análisis y discusión de resistencia al corte

4.5.1.1 Presentación y análisis de la resistencia al corte

Resultó de las pruebas de ensayos triaxiales UU con dos replicas para cada grupo de investigación (GC y GE), y, de ello se tienen los siguientes ítems:

Objetivo:

Determinar y analizar los efectos del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima.

Variable respuesta: resistencia al corte $S_u = C_u (kg/cm^2)$.

Diseño factorial: bifactorial de dos niveles, como se aprecia en la tabla adjunta.

Tabla 78: Arreglo factorial 2x2 de variable de respuesta de la resistencia al corte.

		Factor A: métodos de estabilización			
		Estabilización mecánica (-)		Estabilización química (+)	
		Réplica 01	Réplica 02	Réplica 01	Réplica 02
Factor B: Tipos de suelo	Suelo granular grueso GM (+)	5.15	5.00	6.37	6.47
	Suelo de grano fino CL (-)	3.35	3.75	3.82	3.96

Proceso de prueba de hipótesis

Se definieron los niveles de confiabilidad del 95% de probabilidad de que el valor de la muestra represente a la población, y con una significancia del 5% de cometer un error; y se planteó el contraste de las hipótesis nulas y alternas respectivas en cada factor:

1. Ho = Hipótesis Nula (Ho): $\alpha_i = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $\alpha_i \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de los métodos de estabilización en la resistencia al corte).
2. Ho = Hipótesis Nula (Ho): $\beta_j = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $\beta_j \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de los tipos de suelo en la resistencia al corte).
3. Ho = Hipótesis Nula (Ho): $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de interacción de los métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte).

Análisis de varianza (ANOVA):

Se procesó en Minitab y se asumió supuestos de que los residuos son independientes, tienen una varianza constante y presentan una distribución normal, del cual se tiene:

Tabla 79: Regresión factorial de resistencia al corte vs. estabilización, suelos

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	10.1461	3.38205	127.56	0.000
Lineal	2	9.6411	4.82056	181.82	0.000
Estabilización	1	1.4196	1.41961	53.55	0.002
Suelos	1	8.2215	8.22151	310.10	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.5050	0.50501	19.05	0.012
Estabilización*Suelos	1	0.5050	0.50501	19.05	0.012
Error	4	0.1060	0.02651		
Total	7	10.2522			

Principales efectos de factor o interacción

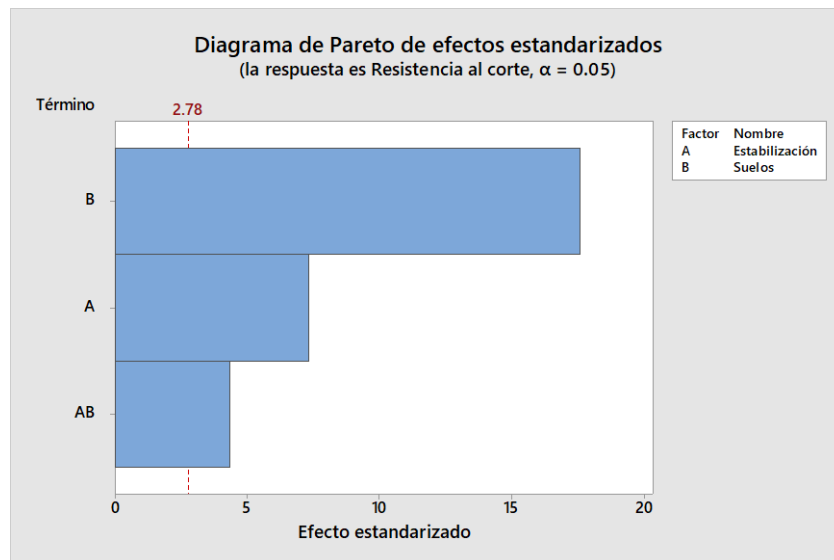
Con el criterio de “p-value” se hizo el contraste de las hipótesis de los efectos:

- El factor A tiene $p < 0.05$; por lo tanto, hay un efecto significativo de los métodos de estabilización en la resistencia al corte.
- El factor B tiene $p < 0.05$; por lo tanto, hay un efecto significativo de los tipos de suelos en la resistencia al corte.
- El factor AB tiene $p < 0.05$; por lo tanto, hay un efecto significativo de interacción de los métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte.

Gráfico de diagrama de Pareto

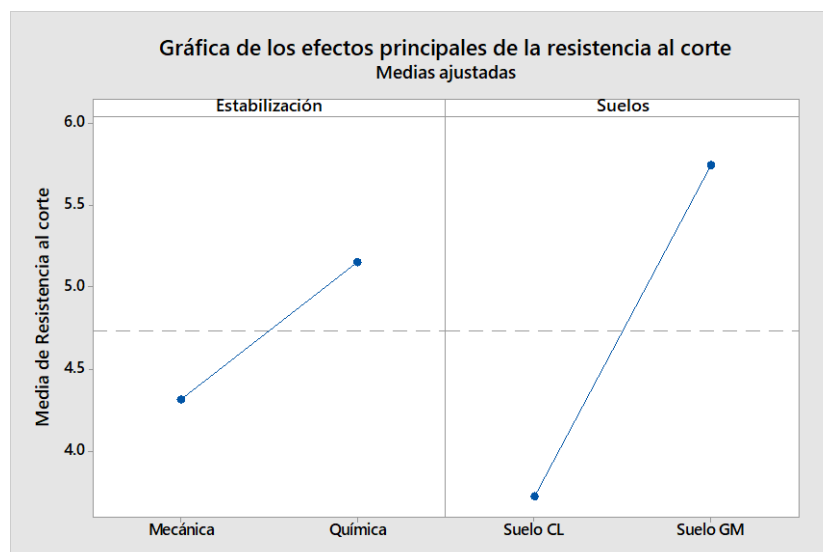
Mediante esta gráfica, se confirma el efecto de significancia de los tres factores limitados por la línea divisoria, en la que el factor B presenta mayor significancia.

Figura 60: Diagrama de Pareto de variable de respuesta de resistencia al corte



Gráficas de efectos principales

Figura 61: Gráfica de efectos principales de variable de respuesta de resistencia al corte

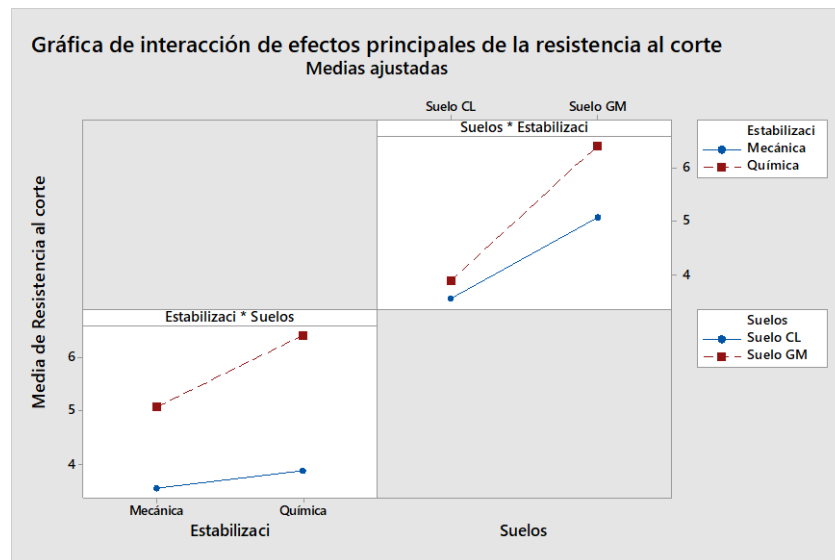


De la gráfica de efectos principales, el efecto del factor A tiene influencia positiva, y, del mismo modo, el factor B tiende a una mayor influencia positiva con respecto al otro factor.

Gráficas de interacción de efectos principales

De la gráfica de interacción, existe una ligera interacción de influencia positiva con menor predominio del factor A (métodos de estabilización); sin embargo, la interacción es significativa con mayor influencia del factor B (tipo de suelos).

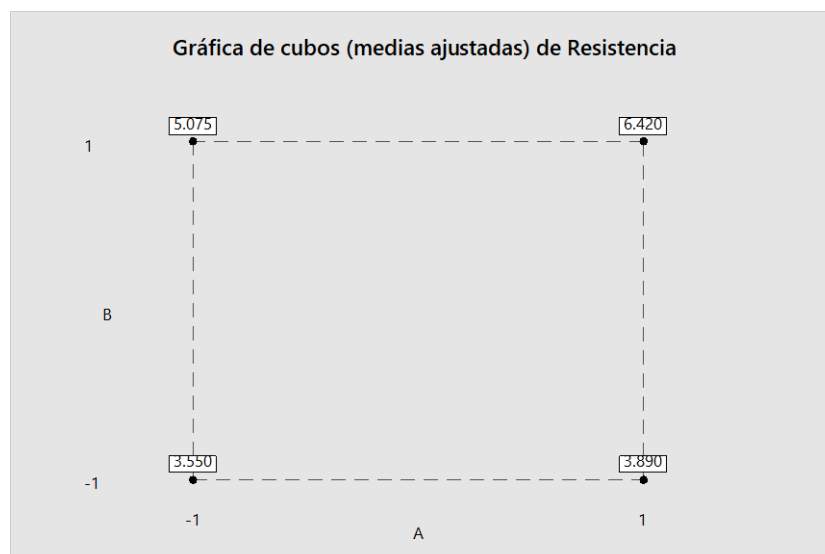
Figura 62: Gráfico de interacción de efectos principales de variable de respuesta de resistencia al corte



Gráfica del cubo factorial

De la gráfica, se extrae que los mejores resultados de significancia de la resistencia al corte se encuentran en el vértice de valor 6.420 de A (+) y B (+).

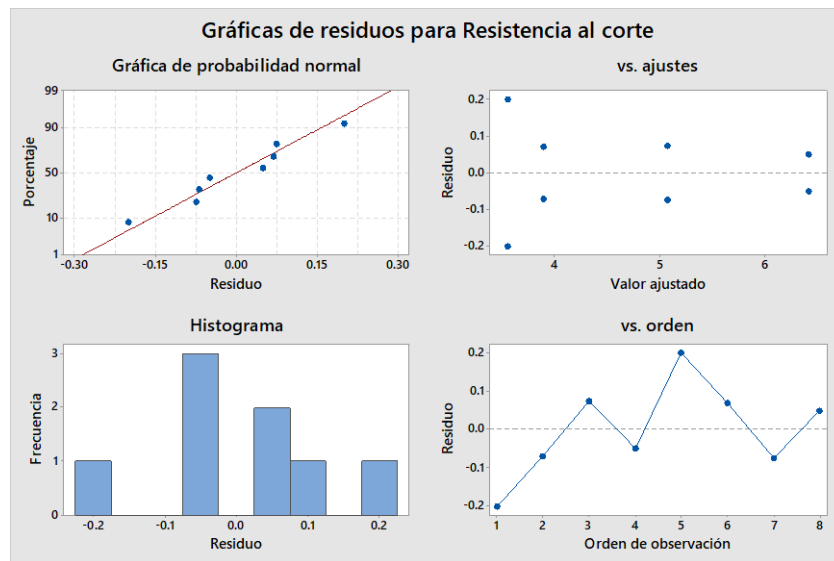
Figura 63: Gráfica de cubos de la variable resistencia al corte



Comprobación de supuestos de los datos

Se comprobó la independencia de los residuos en la gráfica residuo vs orden de observación con una dispersión uniforme y absoluta entre los datos, y presenta una varianza constante o homogénea con una dispersión alineada en la gráfica residuo vs ajustes; asimismo, tiene una distribución normal verificada con el “p-value” de Anderson Darling, igual a $0.613 > 0.05$ (valor de significancia), que visiblemente se aprecia en la forma de campana de Gauss en la gráfica del histograma.

Figura 64: Gráfica de residuos para la resistencia al corte



Conclusión

- Los factores A, B y AB generan efectos incrementales (positivos) significativos en la variable de respuesta de la resistencia al corte en un mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla.
- El mayor efecto de significancia en la variable de respuesta de resistencia al corte se encuentra en el vértice de valor 6.420 de A (+) y B (+); el cual le corresponde al tratamiento del método de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM.

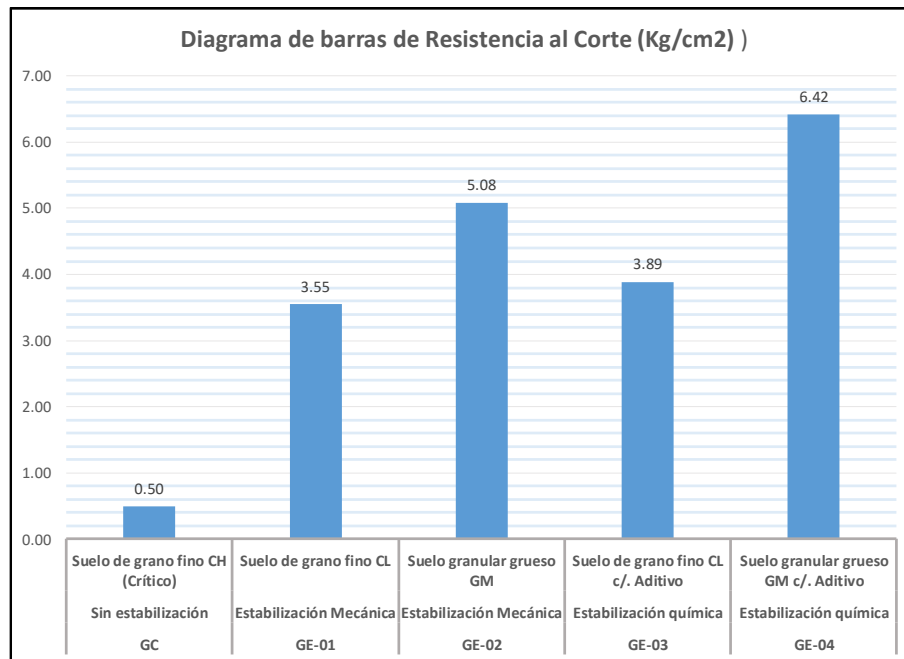
4.5.1.2 Discusión de datos de resistencia al corte

a) Con el análisis de diseño factorial, se acepta la hipótesis de la investigación:

H_A : El uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos generan efectos incrementales significativos de resistencia al corte en el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla - Lima.

- b) Los factores A, B y AB tienen influencia positiva (incremental), significativamente, de manera independiente como conjuntamente, en la variable respuesta de la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno.
- c) Con el tratamiento del método de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM, se alcanzó el mayor efecto de significancia en la variable de respuesta de resistencia al corte con respecto a los demás tratamientos, tal cual se evidencia en el histograma siguiente:

Figura 65: Diagrama de barras de resistencia al Corte en grupos de investigación



- d) Con el análisis factorial, se identificaron claramente los tipos de influencias positivas de los efectos de significancia de cada factor en la resistencia al corte.
- e) El efecto del factor B (tipos de suelos) tiene mayor significancia y preponderancia sobre el otro factor de la estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno, y con ello, (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 393), confirma que la resistencia al corte de una masa de suelo friccionante depende de las características del propio material como: compactación, forma de granos, distribución granulométrica, resistencia individual de las partículas y su tamaño.

4.5.1 Presentación, análisis y discusión de parámetros de resistencia

4.5.1.1 Presentación y análisis de los parámetros de resistencia

Resultó del diagrama del círculo de Mohr y de la envolvente de falla de Mohr Coulomb de los ensayos triaxiales UU con dos replicas para cada grupo de investigación (GC y GE), y de ello se tienen los siguientes ítems:

Objetivo:

Determinar y analizar la influencia de los efectos del uso de métodos de estabilización y tipos de suelos en los parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla - Callo bajo esfuerzos de compresión triaxial UU.

Los parámetros son la cohesión " C " y el ángulo de fricción interna " ϕ ".

A. Análisis de diseño factorial de la cohesión

Variable respuesta: cohesión " C " (kg/cm^2).

Diseño factorial: bifactorial de dos niveles, como se aprecia en la tabla adjunta.

Tabla 80: Arreglo factorial 2x2 de variable de respuesta de la cohesión.

		Factor A: métodos de estabilización			
		Estabilización mecánica (-)		Estabilización química (+)	
		Réplica 01	Réplica 02	Réplica 01	Réplica 02
Factor B: Tipos de suelo	Suelo de granular grueso GM (+)	1.05	1.00	1.15	0.95
	Suelo de grano fino CL (-)	1.45	1.90	1.50	1.56

Proceso de prueba de hipótesis

Se definieron los niveles de confiabilidad del 95% de probabilidad de que el valor de la muestra represente a la población, y con una significancia del 5% de cometer un error; y se planteó el contraste de las hipótesis respectivas de cada factor:

1. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $\alpha_i = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $\alpha_i \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de los métodos de estabilización en la cohesión).
2. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $\beta_j = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $\beta_j \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de los tipos de suelos en la cohesión).
3. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de interacción de los métodos de estabilización y tipos de suelos en la cohesión).

Análisis de varianza (ANOVA):

Se procesó en Minitab asumiendo supuestos de que los residuos son independientes, con una varianza constante y presentan una distribución normal. Está dado por:

Tabla 81: Regresión factorial de cohesión vs. estabilización, suelos

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	0.660100	0.220033	7.08	0.045
Lineal	2	0.645650	0.322825	10.39	0.026
Estabilización	1	0.007200	0.007200	0.23	0.655
Suelos	1	0.638450	0.638450	20.55	0.011
Interacciones de 2 términos	1	0.014450	0.014450	0.47	0.533
Estabilización*Suelos	1	0.014450	0.014450	0.47	0.533
Error	4	0.124300	0.031075		
Total	7	0.784400			

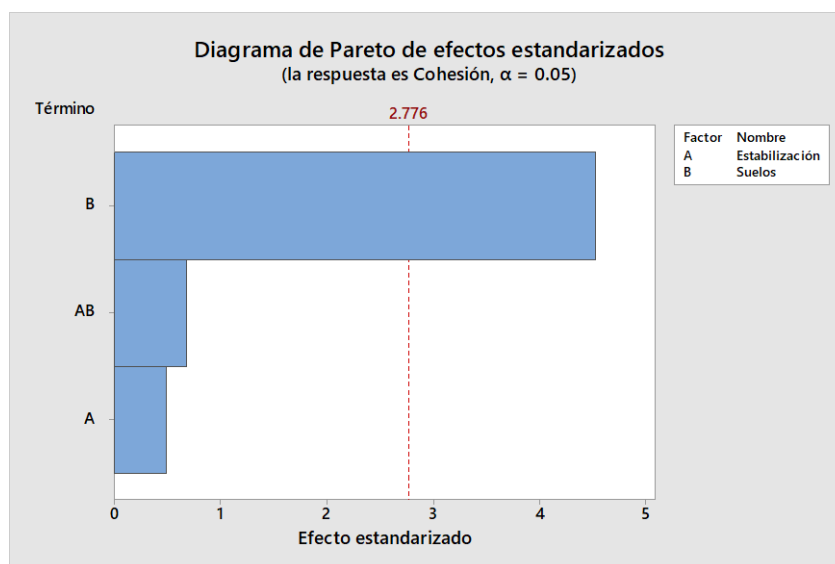
Principales efectos de factor o interacción

A partir de los “p-value”, podemos hacer el contraste de las hipótesis de los efectos principales y de interacción.

- El factor A tiene $p > 0.05$; por lo tanto, no hay un efecto significativo de los métodos de estabilización en la cohesión.
- El factor B tiene $p < 0.05$; por lo tanto, hay un efecto significativo de los tipos de suelos en la cohesión.
- El factor AB tiene $p > 0.05$; por lo tanto, no hay un efecto significativo de interacción de los métodos de estabilización y tipos de suelos en la cohesión.

Gráfico de diagrama de Pareto

Figura 66: Diagrama de Pareto de variable de respuesta de la cohesión

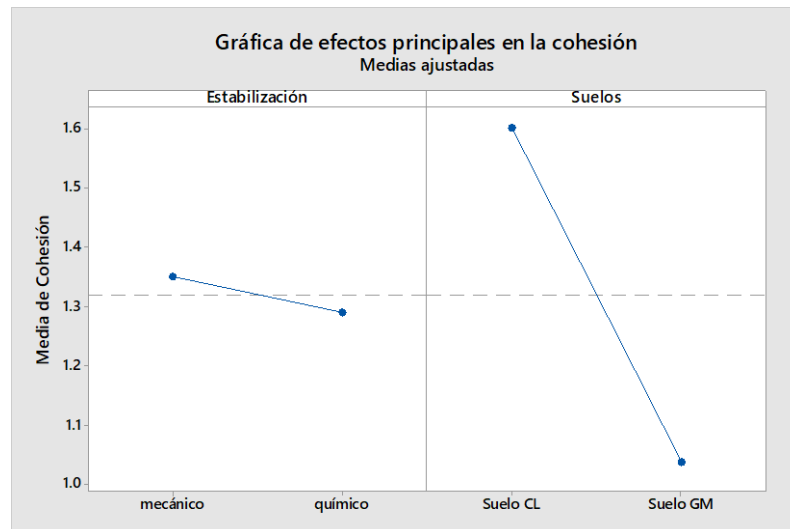


De este diagrama, se confirma que el efecto de significancia le corresponde sólo al factor B; mientras que el factor A y el factor de interacción AB no presentan efectos significativos.

Gráficas de efectos principales

De la gráfica de efectos principales, el efecto del factor B es significativo de influencia negativa (decremento); mientras que en el factor A no hay significancia visible.

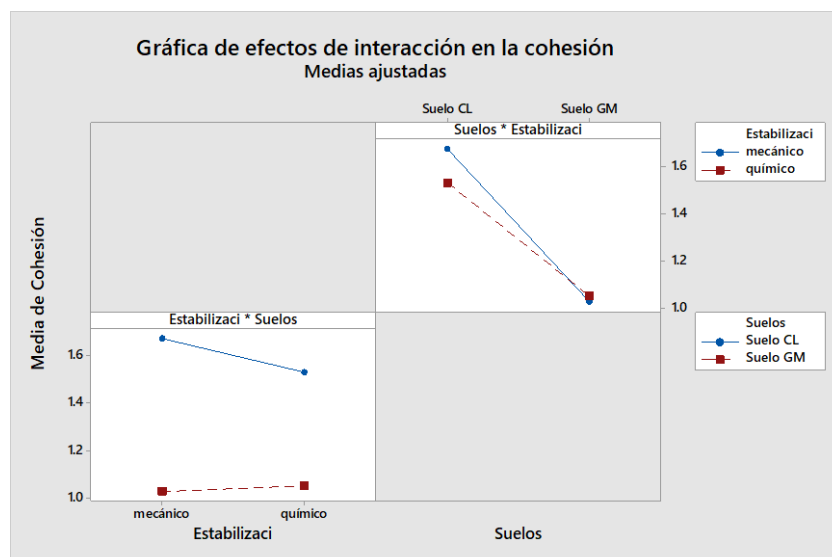
Figura 67: Gráfica de efectos principales de variable de respuesta de la cohesión



Gráficas de interacción de efectos principales

Presenta una interacción ligera del factor AB de influencia negativa sobre el factor A; y también se aprecia una interacción de mayor influencia negativa del factor BA sobre el factor B (tipo de suelos); es decir, existe interacción, pero no es significativa.

Figura 68: Gráfico de interacción de efectos principales de variable de respuesta de la cohesión



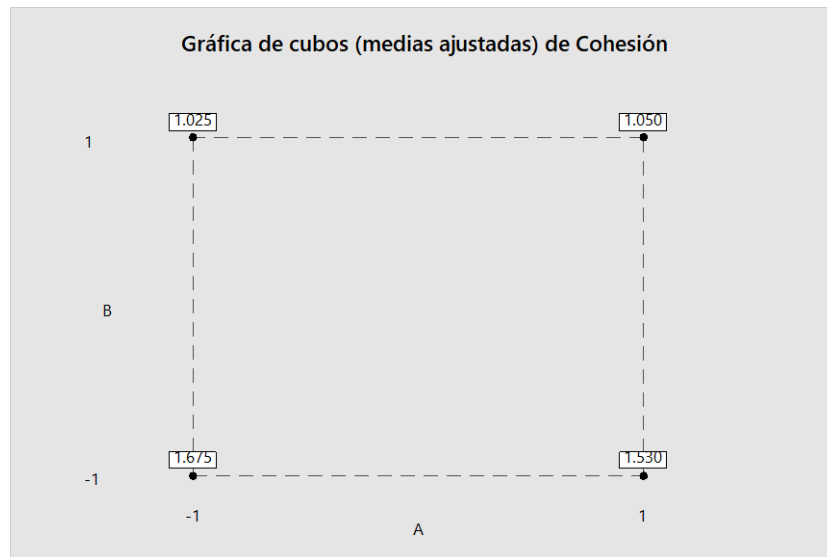
Asimismo, se identifica que el tipo de suelo de grano fino CL y la estabilización química tienen el efecto de decremento sobre la cohesión; mientras que en el suelo granular

grueso GM y la estabilización química tienen efecto ligero de incremento sobre la cohesión.

Gráficas de cubo factorial

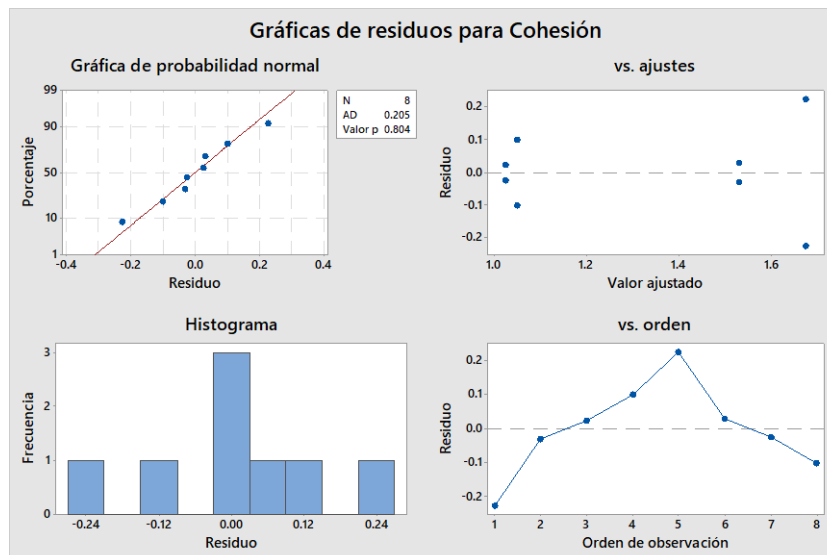
De la gráfica, se extrae que los mejores resultados de significancia en la cohesión se encuentran en el vértice de valor 1.675 de A (-) y B (-).

Figura 69: Gráfica de cubos de la variable de la cohesión



Comprobación de supuestos de los datos

Figura 70: Gráfica de residuos para la variable de la cohesión



Hay independencia de los residuos en la gráfica residuo vs orden de observación con una dispersión uniforme y absoluta entre los datos, y presenta una varianza constante o homogénea con una dispersión alineada en la gráfica residuo vs ajustes; asimismo,

tiene una distribución normal verificada con el “p-value” de Anderson Darling, igual a $0.804 > 0.05$ (valor de significancia), como se aprecia en la figura.

Conclusión

El factor B de tipos de suelos genera efectos de influencia negativa significativa en la variable respuesta de la cohesión en un mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla; es decir, en un tratamiento con suelo de grano fino CL, transita significativamente de forma negativa en la cohesión con un suelo granular grueso GM.

El mayor efecto de significancia de la variable respuesta en la cohesión se encuentra en el vértice de valor 1.675 de A (-) y B (-); el cual le corresponde al tratamiento del método de estabilización mecánica con un tipo de suelo de grano fino CL.

B. Análisis de diseño factorial del ángulo de fricción

Variable respuesta: ángulo de fricción “ ϕ ” (°).

Diseño factorial: bifactorial de dos niveles, como se aprecia en la tabla adjunta:

Tabla 82: Arreglo factorial 2x2 de variable de respuesta del ángulo de fricción.

		Factor A: métodos de estabilización			
		Estabilización mecánica (-)		Estabilización química (+)	
		Réplica 01	Réplica 02	Réplica 01	Réplica 02
Factor B: Tipos de suelo	Suelo de granular grueso GM (+)	44.52	43.75	48.61	49.61
	Suelo de grano fino CL (-)	26.10	24.51	30.21	29.69

Proceso de prueba de hipótesis

Se definieron los niveles de confiabilidad del 95% de probabilidad de que el valor de la muestra represente a la población y con una significancia del 5% de cometer un error. Y se planteó el contraste de las hipótesis respectivas de cada factor:

1. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $\alpha_i = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $\alpha_i \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de los métodos de estabilización en el ángulo de fricción).
2. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $\beta_j = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $\beta_j \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de los tipos de suelos en el ángulo de fricción).

3. H_0 = Hipótesis Nula (H_0): $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ Vs Hipótesis alterna (H_A): $(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ (No hay efecto, Vs hay efecto significativo de interacción de los métodos de estabilización y tipos de suelos en el ángulo de fricción).

Análisis de varianza (ANOVA):

Se procesó en Minitab asumiendo supuestos de que los residuos son independientes, con una varianza constante y presentan una distribución normal, del cual se tiene:

Tabla 83: Regresión factorial de ángulo de fricción vs. estabilización, suelos

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	767.947	255.982	466.33	0.000
Lineal	2	767.892	383.946	699.45	0.000
Estabilización	1	46.272	46.272	84.30	0.001
Suelos	1	721.620	721.620	1314.61	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.054	0.054	0.10	0.769
Estabilización*Suelos	1	0.054	0.054	0.10	0.769
Error	4	2.196	0.549		
Total	7	770.142			

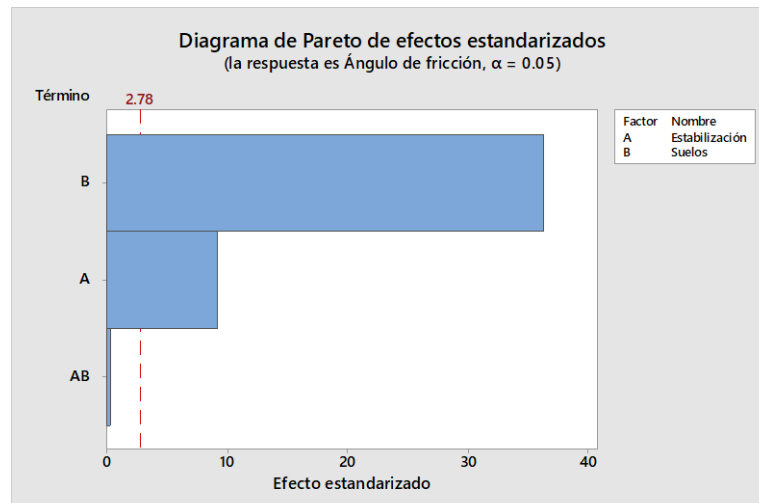
Principales efectos de factor o interacción

Con el “p-value”, se hizo el contraste de hipótesis de efectos principales y de interacción.

- El factor A tiene $p < 0.05$, por lo tanto, hay un efecto significativo de los métodos de estabilización en el ángulo de fricción
- El factor B tiene $p < 0.05$, por lo tanto, hay un efecto significativo de los tipos de suelos en el ángulo de fricción
- El factor AB tiene $p > 0.05$, por lo tanto, no hay un efecto significativo de interacción de los métodos de estabilización y tipos de suelos en el ángulo de fricción.

Gráfico de diagrama de Pareto

Figura 71: Diagrama de Pareto de variable de respuesta del ángulo de fricción

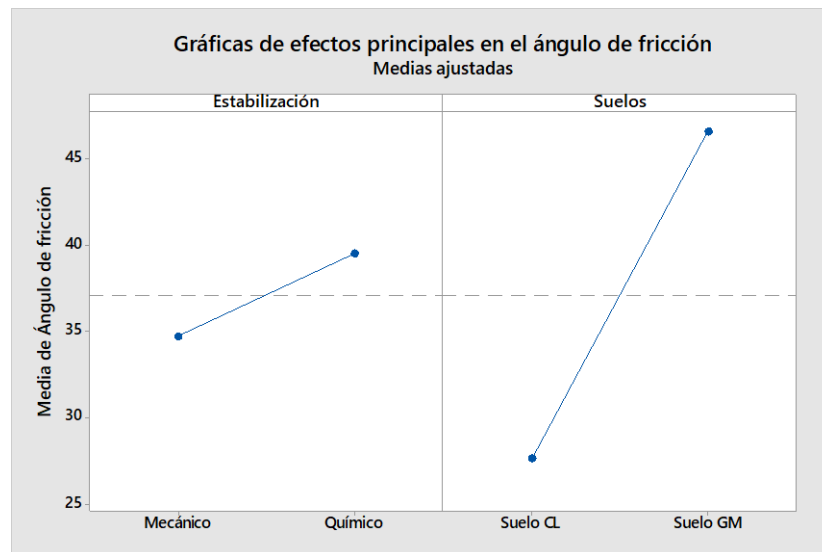


A través de la línea divisoria de este diagrama, también se verificó y confirmó que el efecto de significancia se da sólo para los factores A y B de forma independiente y no presenta significancia del factor AB de interacción.

Gráficas de efectos principales

El efecto del factor A es ligeramente significativo de influencia positiva (incremento), y el factor B es mayormente significativo con influencia positiva (incremento).

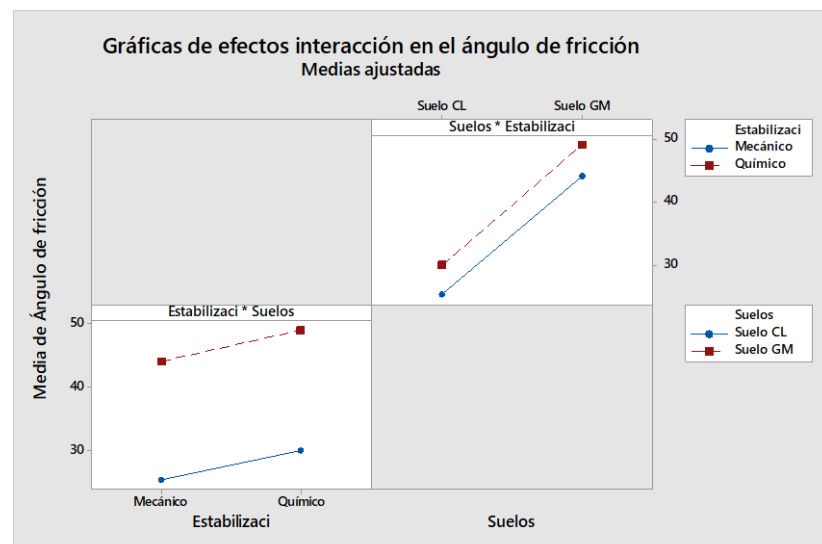
Figura 72: Gráfica de efectos principales de variable de respuesta del ángulo de fricción



De los efectos principales, se aprecia que el suelo del tipo GM presenta mayor incremento del ángulo de fricción con respecto al suelo CL. Y, del mismo modo, se tiene que la estabilización química reporta mejores incrementos de la resistencia de fricción.

Gráficas de interacción de efectos principales

Figura 73: Gráfico de interacción de efectos principales en el ángulo de fricción

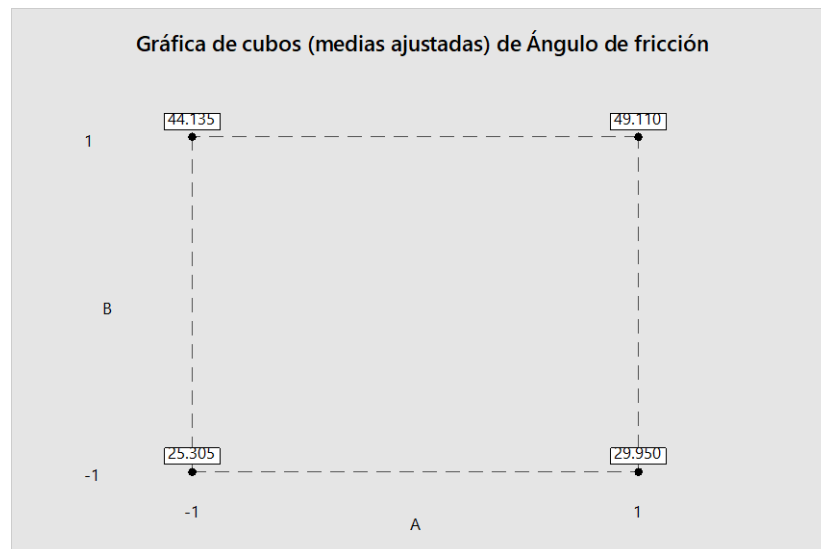


De la gráfica, se confirma que no presenta una interacción del factor AB de influencia positiva sobre el factor A; y también se aprecia que no hay interacción del factor BA sobre el factor B; por lo que existen efectos independientes de cada factor.

Gráficas de cubo factorial

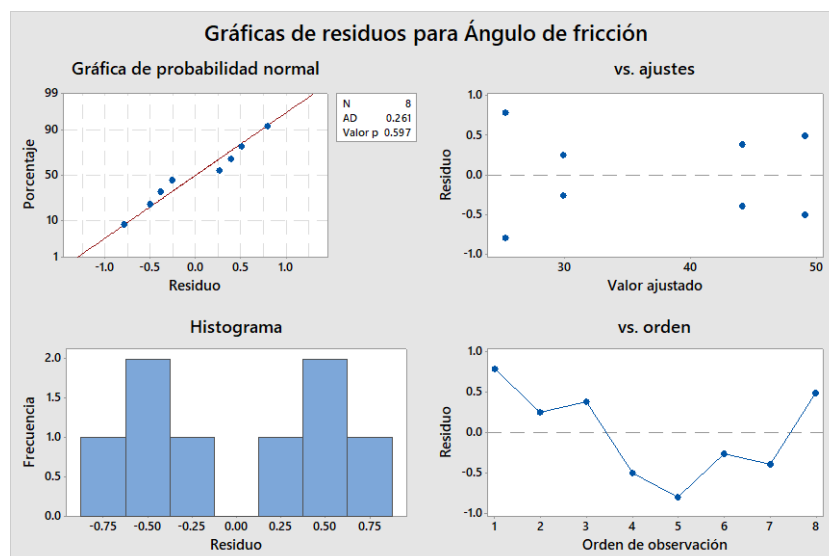
De la gráfica, se extrae que los mejores resultados de significancia en el ángulo de fricción se encuentran en el vértice de valor 49.110 de A (+) y B (+).

Figura 74: Gráfica de cubos de la variable ángulo de fricción



Comprobación de supuestos de los datos

Figura 75: Gráfica de residuos para el ángulo de fricción



Se comprobó la independencia de los residuos en la gráfica residuo vs orden de observación con una dispersión uniforme y absoluta entre los datos, y presenta una

varianza constante o homogénea con una dispersión alineada en la gráfica residuo vs ajustes; asimismo, tiene una distribución normal verificada con el “p-value” de Anderson Darling, igual a $0.597 > 0.05$ (valor de significancia), que visiblemente se aprecia en la forma de campana de Gauss en la gráfica del histograma.

Conclusión

Los factores A y B generaron efectos de influencia positiva significativa en la variable respuesta del ángulo de fricción en un mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla.

El factor A (mecánica y química) genera incrementos superiores en el ángulo de fricción en suelo granular grueso GM sobre suelo de grano fino CL.

El mayor efecto de significancia del ángulo de fricción se encuentra en el vértice de valor 49.110 de A (+) y B (+); el cual corresponde al tratamiento del método de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM.

4.5.1.2 Discusión de resultados en parámetros de resistencia

a) Con el diseño factorial, se alcanzó aceptar la hipótesis nula de:

Ho: El efecto del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en los parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla - Lima bajo esfuerzos de compresión triaxial UU no es significativo.

- b) Los efectos de significancia de los factores en los parámetros de resistencia son dispares debido a que la cohesión y el ángulo de fricción tienen un comportamiento antagónico, pues la influencia negativa del primero implica la influencia positiva del segundo de forma independiente.
- c) Del análisis factorial se pueden apreciar los efectos de incremento y decremento de los tratamientos sobre la variable respuesta de los parámetros de resistencia, dado que el comportamiento de suelos granulares y finos es diferente tanto para la estabilización mecánica como para la química.
- d) La variable respuesta de la cohesión existe un efecto significativo del factor B con tendencia negativa y con interacción mínima entre factores A y B.
- e) En la variable respuesta del ángulo de fricción presenta un efecto significativo del factor A y B con tendencia positiva y no tiene interacción entre factores A y B.
- f) Con el tratamiento del método de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM, se alcanzó el mayor efecto en

la variable de respuesta del ángulo de fricción con respecto a los demás tratamientos.

- g) Con el tratamiento del método de estabilización mecánica con un suelo de grano fino CL, se alcanzó el mayor efecto en la variable de respuesta de la cohesión con respecto a los demás tratamientos.

4.5.2 Presentación, análisis y discusión de capacidad Portante

4.5.2.1 Presentación y análisis de capacidad Portante

Resultó de las consideraciones realizadas en el numeral 3.8.5) para el cálculo y determinación de la misma, a partir de la media de los parámetros concernientes a ella, para cada grupo de investigación, y de ello, se presentaron los siguientes ítems:

- a) **Tipo de terreno.** - El terreno presenta varias capas y es estratificado; sin embargo, se idealizó un terreno de suelo homogéneo sin tratamiento correspondiente al suelo crítico "CH" de la calicata C-04' (GC), y un terreno con tratamiento de estabilización de suelos (GE), que conforma dos estratos de suelo mejorado (suelo fuerte) sobre suelo idealizado crítico de calicata C-04' (suelo débil).
- b) **Tipo de cimentación.** – Se propuso dos alternativas:
- Mixto con anillo perimetral de muro de sección trapezoidal ($H = 6\text{ m}$, $c = 18$, $a = 3\text{ m}$, y pendientes de taludes laterales según norma API 650), y sub rasante circular de 2.0 m de espesor.
 - Mixto con anillo perimetral de muro de sección cuadrada ($A = 6.0\text{ m}$ con $H = 6.0\text{ m}$ de profundidad) y superficie circular de sub rasante con una profundidad de 2.0 m.

Para nuestro estudio, se analizó la capacidad de carga sobre el modelo idealizado de suelo con tratamiento en la sección del anillo perimetral por presentar mayor concentración de carga en éste, en la que se asumió análogamente a una cimentación corrida de ancho de zapata $B = 3\text{ m}$, en la que H se asume relativamente grande con respecto a la base "B" de la cimentación anular asumida; es decir, se rigió bajo la condición de que el estrato fuerte absorbería la superficie de falla, como se ilustra en el caso b) de la figura 32.

- c) **Casuística de capacidad de carga.** - Se asumió el caso de "capacidad de carga de suelo fuerte sobre suelo débil" para el cálculo de capacidad de carga; por lo que, se determinó la capacidad de carga para ambos estratos (q_1 : *suelo fuerte* y q_2 : *suelo débil*), según las ecuaciones 13 y 14 del literal B) del

numeral 3.8.5.2); del cual, se presenta la capacidad de carga para suelo débil como suelo fuerte para cada grupo de investigación en las tablas adjuntas.

Tabla 84: Capacidad de carga de suelo débil en GC.

Descripción		GRUPO DE CONTROL (GC): Sin estabilización de suelos					
		Valores del Informe geotécnico de la UNALM				Valores verificados en tesis	
Grupo de investigación		GC (C – 03)		GC (C – 04)		GC (C – 04')	
Profundidad	m	h = 2.50		h = 2.50		h = 2.50	
Parámetros geotécnicos	Unid.	Rep. 01	Rep. 02	Rep. 01	Rep. 02	Rep. 01	Rep. 02
Peso unitario (γ_2)	gr/cm^3	-	-	1.38		1.75	1.75
Cohesión aparente (C)	kg/cm^2	-	-	0.44		0.31	0.34
Ángulo de fricción (ϕ)	(°)	-	-	13.52		6.78	5.89
Dimensiones de cimentación corrida							
Ancho de base (B)	m			3.0		3.0	3.0
Capacidad de carga de suelo fuerte sobre suelo débil (Meyerhof)							
q_2 (Suelo débil – crítico)	Tn/m^2	-	-	48.76		23.72	24.50
Clasificación	SUCS	CH con arena		CH		CH	

Tabla 85: Capacidad de carga de estratos fuertes en GE

Tratamiento Experimental		GRUPO EXPERIMENTAL (GE): Con estabilización de Suelos							
Factor A		Estabilización mecánica				Estabilización química			
Factor B		Suelo CL		Suelo GM		Suelo CL		Suelo GM	
Grupo experimental		GE - 01		GE - 02		GE - 03		GE - 04	
Propiedad	Unid.	Rep. 01	Rep. 02	Rep. 01	Rep. 02	Rep. 01	Rep. 02	Rep. 01	Rep. 02
Parámetros de resistencia									
Peso unitario (γ_1)	gr/cm^3	1.84	1.84	2.38	2.38	1.84	1.84	2.39	2.39
Cohesión aparente (C)	kg/cm^2	1.45	1.90	1.05	1.00	1.50	1.56	1.15	0.95
Ángulo de fricción (ϕ)	(°)	26.10	24.51	44.52	43.75	30.21	29.69	48.61	49.61
Dimensiones de cimentación corrida									
Ancho de base (B)	m	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Capacidad de carga de suelo fuerte sobre suelo débil (Meyerhof)									
q_1 (Suelo fuerte)	Tn/m^2	360.14	408.38	2,209.20	1,913.80	523.52	517.82	4,521.00	4,899.90

De la tabla de capacidad de carga de estratos fuertes del grupo experimental, se aprecia que los valores de ángulos de fricción interna (ϕ), están relacionados directamente con los valores incrementales de la capacidad de carga (q_1).

- d) **Condición de casuística.** – El caso de suelo estratificado de suelo fuerte sobre suelo débil, presenta y cumple la condición de relación $\frac{q_2}{q_1} < 1$; de los cuales, dichos cálculos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 86: Valores de condición de suelo fuerte sobre suelo débil

Tratamiento Experimental		GRUPO (GC)	GRUPO (GE)			
Factor A: métodos de estabilización		Sin estabilización	Estabilización mecánica		Estabilización química	
Factor B: tipos de suelos		Suelo CH	Suelo CL	Suelo GM	Suelo CL	Suelo GM
Grupo experimental		GC	GE - 01	GE - 02	GE - 03	GE - 04
Propiedad	Unid.	Media ($\bar{y}$)	Media ($\bar{y}$)	Media ($\bar{y}$)	Media ($\bar{y}$)	Media ($\bar{y}$)
Capacidad de carga de los dos estratos propuestos						
q_1 (Suelo fuerte)	Tn/m^2	-	384.26	2,061.50	520.67	4,710.45
q_2 (Suelo débil)	Tn/m^2	24.11	-	-	-	-
Condición de modelo de suelo fuerte sobre suelo débil ($\frac{q_2}{q_1} < 1$)						
$\frac{q_2}{q_1} < 1$			0.063	0.012	0.046	0.005
Condición:			cumple	cumple	cumple	cumple

- e) **La capacidad portante.** - Es conocido también como la capacidad de carga admisible, y, por la condición asumida de que el estrato fuerte absorbería la falla de corte, cuando “H” es relativamente grande con respecto a la base de la cimentación corrida propuesta, la capacidad de carga admisible del suelo estratificado idealizado está dado por el estrato fuerte $q_u = q_t = q_1$ representado por la ecuación 15), previa aplicación del factor de seguridad F.S = 3 para cada tratamiento en sistema de anillo de suelo mejorado, de los cuales se presentan en la tabla adjunta para cada uno de ellos:

Tabla 87: Valores de capacidad portante de los grupos de investigación CG y GE.

Tratamiento experimental		GRUPO (GC)	GRUPO (GE)			
Factor A: métodos de estabilización		Sin estabilización	Estabilización mecánica		Estabilización química	
Factor B: tipos de suelo		Suelo CH	Suelo CL	Suelo GM	Suelo CL	Suelo GM
Grupo de investigación		GC	GE - 01	GE - 02	GE - 03	GE - 04
Propiedad	Unid.	Media ($\bar{y}$)	Media ($\bar{y}$)	Media ($\bar{y}$)	Media ($\bar{y}$)	Media ($\bar{y}$)
Capacidad de carga de terreno estratificado						
$q_u = q_t = q_1$	Tn/m^2	-	384.26	2,061.50	520.67	4,710.45
q_2 (Suelo débil)	Tn/m^2	24.11	-	-	-	-
Capacidad portante (F.S = 3)						
q_{adm}	Tn/m^2	8.03	128.07	687.17	173.57	1,570.15
$q_{adm} > P_{servicio}=19.48 Tn/m^2$						
Condición de q_{adm} :		No cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple
% de incremento de q_{adm} de suelo GC superior a 200% con mejora de suelos GE			Si cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple

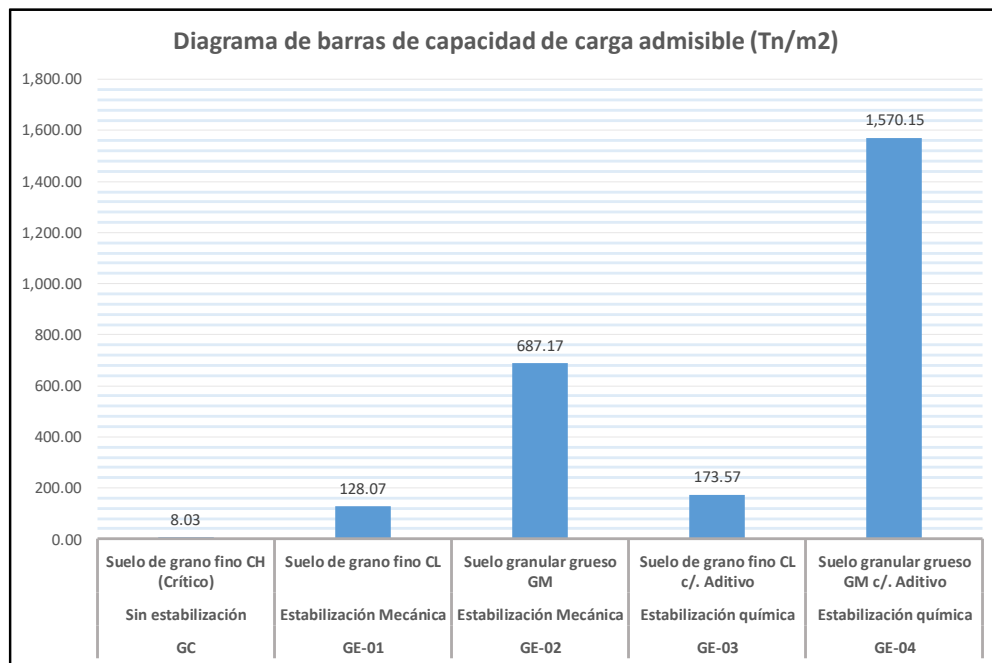
De la tabla se aprecia que todos los tratamientos alcanzan superar ampliamente el q_{adm} del suelo crítico “CH”, con un valor sobresaliente del tratamiento GE-04.

4.5.2.2 Discusiones en resultados de capacidad de carga

- a) Con el análisis tabular e histograma descriptivo se demuestra y acoge la hipótesis, como se aprecia en el diagrama de barras.

H_i : La capacidad portante del suelo crítico se incrementa hasta porcentajes superiores a 200% con el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla - Lima a través del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos.

Figura 76: Diagrama de barras de capacidad portante (Tn/m²) para los grupos de investigación



- b) Existe diferencia notable en la capacidad de carga entre el estrato de suelo crítico "CH" de la calicata C-04 con la calicata C-04' verificada, debido a lo descrito en el literal f) del numeral 4.1.2.2) del presente estudio.
- c) Con la alteración de los valores de las propiedades geotécnicas principales, como la densidad y parámetros de resistencia, se llegó a incrementar la capacidad de carga del terreno natural de forma significativa, y así se logró el interés principal de una mejora de suelos, tal cual lo sostiene (Bowles J. E., 1997, pág. 344).
- d) La combinación de métodos de estabilización y tipos de suelo adecuados nos ayudó a desarrollar y encontrar el mejor resultado de capacidad portante, como lo reportado con el método de estabilización química con aditivo enzimático Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM (GE-04), que tiene mejores porcentajes que las demás variantes de tratamientos.
- e) Con el método de estabilización química en suelos de grano fino CL, se logró un ligero incremento de 35.52% en la capacidad admisible con respecto al método

de estabilización mecánica; mientras que en un suelo granular grueso GM, el incremento es de 128.49 % entre la mecánica y la química.

4.5.3 Presentación, análisis y discusión de CBR

Resultó de las consideraciones realizadas en el literal a.1) del literal a) del numeral 3.8.4.1) para la determinación del índice CBR en cada grupo de investigación, y se realizó de forma complementaria y referencial.

4.5.3.1 Presentación y análisis de CBR

- a) Se determinaron índices CBR con una sola replica para los grupos experimentales GE y se asumió el valor CBR de la calicata C-03 del informe geotécnico de la UNALM para el grupo de control (terreno sin tratamiento), por similitud de condiciones dentro del área de influencia con el suelo de la calicata C-04', con el fin de considerarlo como línea de base y se ilustra en la tabla adjunta.

Tabla 88: Índice CBR de los grupos de investigación (GC y GE)

Tratamiento Experimental		GRUPO DE CONTROL (GC)	GRUPO EXPERIMENTAL (GE)			
Factor A: métodos de estabilización		Sin estabilización	Estabilización mecánica		Estabilización química	
Factor B: Tipos de suelos		Suelo de grano fino CH	Suelo de grano fino CL	Suelo granular grueso GM	Suelo de grano fino CL	Suelo granular grueso GM
Grupo de investigación		GC	GE - 01	GE - 02	GE - 03	GE - 04
Propiedad	Unid.					
C.B.R. (95 %)	%	2.95	15	70	17	67
C.B.R. (100%)	%	3.39	20	127	22	158

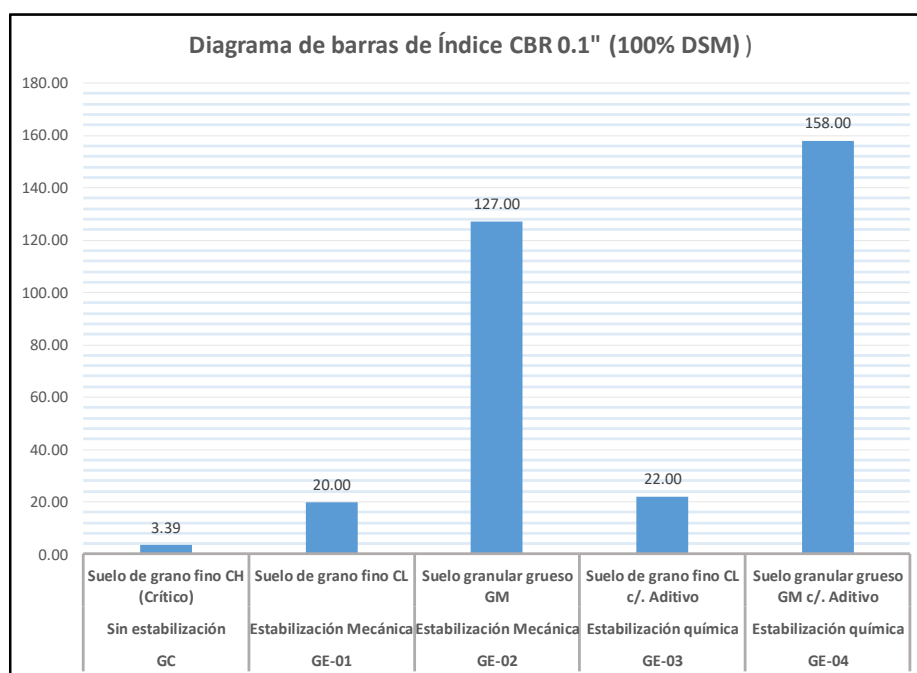
- b) Los índices CBR de suelo con tratamiento (GE) presentan indicadores ascendentes con respecto al suelo sin tratamiento (GC).
- c) Los ensayos de CBR demandaron dos tipos de molde de ensayo de Proctor modificado; pues, para el suelo de grano fino CL, se realizó con el método "A" y para el suelo granular grueso GM con el método "C".

4.5.3.2 Discusión en resultados de CBR

- a) Con el análisis tabular e histograma descriptivo, se demuestra y acoge la hipótesis:

H_i : Al menos una combinación de un método de estabilización y un tipo de suelos para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima logra alcanzar superar el 150% de CBR.

Figura 77: Diagrama de barras de Índice CBR de grupos de investigación



Donde el tratamiento del método de estabilización química con aditivo Terrazyme y suelo granular grueso GM alcanza un 158% de CBR de 0.1" de 100% DSM.

- b) Con los tratamientos de mejora de suelos (GE), se llegó a alcanzar indicadores desde categorías de sub rasante buena hasta superar el excelente según la categorización de (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014, pág. 35); tal cual, la tabla adjunta de categorías lo clasifica.

Tabla 89: Categorías de Sub rasante

Categorías de Sub rasante	CBR
S_0 : Sub rasante inadecuada	CBR < 3%
S_1 : Sub rasante insuficiente	CBR $\geq$ 3% a CBR < 6%
S_2 : Sub rasante regular	CBR $\geq$ 6% a CBR < 10%
S_3 : Sub rasante buena	CBR $\geq$ 10% a CBR < 20%
S_4 : Sub rasante muy buena	CBR $\geq$ 20% a CBR < 30%
S_5 : Sub rasante excelente	CBR $\geq$ 30%

Fuente: (Sección Suelos y Pavimentos - MTC, 2014)

- c) Con los tratamientos de estabilización mecánica sobre suelo de grano fino CL (GE-01), se logró alcanzar un suelo de sub rasante buena; mientras que con la estabilización química sobre el mismo suelo (GE-03), se llegó a alcanzar una sub rasante muy buena.
- d) Con los tratamientos de estabilización mecánica y química sobre suelo granular grueso GM (GE-02 y GE-04), se llegaron a superar ampliamente los porcentajes de sub rasante excelente.

Capítulo V

CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones generales

- a) Del mejoramiento de terreno en la Pampilla-Lima para un tanque $D_t=48.30$ y $H_t=19.20$, se concluye que es factible, pues existen diversas técnicas de mejora, y, de acuerdo a las condicionantes de las características de terreno, tipo de suelos y tipo de estructura, se adaptan favorablemente las técnicas como la compactación con pilares cortos, vibroreemplazo (columnas de grava) y la estabilización de suelos; este último se decantó con mayor preponderancia por la amplia variedad de métodos y experiencias favorables en el sector transportes para su evaluación, y que la norma API 650 recomienda como alternativa de uso.
- b) De la simulación de la estabilización de suelos como técnica para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales para tanques de hidrocarburos en la Pampilla-Lima, se concluye que es posible su uso, previa evaluación de esta técnica, a través de la selección de un método de estabilización y tipo de suelos adecuados que tengan efectos significativos positivos en la resistencia al corte para otorgarle una capacidad portante confiable.
- c) Del resultado del análisis de diseño factorial del desarrollo de simulación de tratamientos de métodos de estabilización (mecánico o químico con aditivo Terrazyme) y tipos de suelos (suelo de grano fino CL o suelo granular grueso GM) para evaluar la variable de respuesta de la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno en tanques superficiales, se concluye que tienen un efecto significativo incremental positivo, del que se desprende que el factor tipo de suelo tiene mayor significancia en la variable estudiada.
- d) De la significancia incremental positiva en el desarrollo de la simulación de un tratamiento del método de estabilización y un tipo de suelos en la resistencia al corte, se concluye que se logró encontrar la combinación óptima con el método químico con aditivo Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM que presenta un mayor efecto significativo de influencia positiva en el mejoramiento de terreno para tanques superficiales.
- e) De la investigación experimental, bajo un diseño de arreglo factorial, se concluye que es ventajoso porque nos permitió evaluar simultáneamente distintos factores de la estabilización de suelos para desarrollar un método (mecánico o químico) y

un tipo de suelo (suelo de grano fino CL o suelo granular grueso GM) confiable a través de especímenes con pruebas triaxiales UU de resistencia al corte para el mejoramiento del terreno.

5.2 Conclusiones específicas

- a) De la evaluación por medio del análisis factorial de los métodos de estabilización (mecánico o químico) y tipos de suelo (suelo de grano fino CL o suelo granular grueso GM) en la variable de respuesta de los parámetros de resistencia (ϕ, c), se concluye que tienen efectos significativos dispares; pues éstos tienen comportamientos antagónicos.
- b) De la significancia dispareja de los parámetros de resistencia, se desprende que los factores del método de estabilización y tipos de suelos, presentan efectos significativos de influencia positiva, de forma aislada sin interacción en la variable del ángulo de fricción; y en la cohesión se presentan sólo efectos significativos de influencia negativa del factor tipo de suelos y con una ligera e insignificante influencia negativa en el factor del método de estabilización; asimismo, tiene una ligera interacción de ambos factores con la misma tendencia negativa.
- c) Del comportamiento antagónico de los parámetros de resistencia bajo distintos tratamientos, se concluye que, es desproporcional, debido a que, al densificar en un suelo de grano fino, las partículas se juntan en un espacio muy pequeño y generan una superficie de mayor contacto y cohesión entre las mismas, mientras que en un material de suelo granular grueso de gradación ideal de finos, arena y grava, se genera una mayor superficie de contacto interna entre partículas y por ende se aumenta el ángulo de fricción interna producto del rozamiento; sin embargo, al incrementar la proporción de gravas, se disminuye la proporción de finos como limos cohesionantes y/o arcillas que restan la cementación total, y, asimismo, al aplicar un aditivo enzimático incide en menor medida sobre la cohesión y ligeramente en mayor medida sobre el ángulo de fricción.
- d) De la capacidad portante del terreno mejorado en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima, a través del uso de distintos métodos de estabilización (mecánica o química), y tipos de suelos (suelo de grano fino o suelo granular grueso), se concluye que es sustancial la diferencia incremental, y logró superar ampliamente en más del 200% de la capacidad portante del suelo crítico.
- e) Con la simulación de los tratamientos de estabilización de suelos que resultaron de la combinación de métodos de estabilización (mecánica o química con aditivo

Terrazyme) y tipos de suelos (suelo de grano fino o suelo granular grueso), se logró alcanzar superar los índices de CBR de categorías de sub rasante buena y sub rasante excelente del manual del MTC, hasta llegar a superar indicadores de 150% con el tratamiento de combinación del método químico con aditivo Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM.

- f) De los métodos de estabilización y tipos de suelos asumidos, se concluye que son propicios para lograr efectos significativos en la resistencia al corte por los antecedentes favorables de índice CBR en estructuras de “Base” en pavimentos y superficies de rodadura a nivel de “Afirmado” de carreteras.
- g) Del cumplimiento de capacidad portante y asientos permisibles con los distintos tratamientos de estabilización de suelos propuestos, se concluye que es disparate, pues sólo con el tratamiento de combinación del método químico con aditivo Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM se alcanzaron resultados óptimos bajo un sistema de suelo mejorado análogo al tipo de cimentaciones de tierra con anillo de piedras trituradas y grava recomendada por la norma API 650.
- h) Del tipo de cimentación aplicada para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales para tanques grandes de diámetro 48.30 m y altura 19.20 m de hidrocarburos en la Pampilla-Lima, se concluyó que la geometría conformada por un anillo perimetral de muro de sección trapezoidal (altura $H = 6$ m, base mayor $C = 18$ m, base menor $a = 3$ m, y pendientes de taludes laterales según norma API 650) y sub rasante circular de espesor 2 m de suelo mejorado, cumplió íntegramente con la capacidad portante y asientos totales y diferenciales inmediatos permisibles para los distintos tratamientos propuestos.
- i) De la optimización de la geometría bajo un tratamiento de estabilización, se concluye que el anillo perimetral de muro de sección trapezoidal ($H = 4.50$ m, $C = 14.25$ m, $a = 3$ m, y pendientes de taludes laterales según norma API 650), y sub rasante circular de espesor 2 m de terreno mejorado con método químico con aditivo Terrazyme y un tipo de suelo granular grueso GM, cumple satisfactoriamente los criterios de diseño y presenta menor dimensión con respecto a otros y tiene asientos permisibles aceptables.
- j) Del método de estabilización química con aditivo Terrazyme, se concluye que es propicio cuando hay correspondencia con los requisitos de las especificaciones técnicas del producto, pues el resultado fue más bondadoso para el suelo granular grueso GM que el suelo de grano fino CL; y con esto, se confirma que no existe un aditivo universal para todo tipo de suelos en diferentes condiciones para su mejor desempeño, como lo sostiene en sus conclusiones (Ugaz Palomino, 2006).

Capítulo VI

RECOMENDACIONES

6.1 Recomendaciones generales

- a) Del mejoramiento del terreno en la Pampilla-Lima, para este tipo de estructuras, se recomienda evaluar otras alternativas de técnicas como la compactación con pilares cortos y vibroreemplazo (columnas de grava).
- b) Del método de estabilización y tipos de suelos propicios para el mejoramiento del terreno en la Pampilla-Lima, se recomienda el uso del método químico con una dosificación óptima de aditivo enzimático Terrazyme asociado a suelos que tengan la gradación ideal e índices de plasticidad dentro de los rangos recomendados.
- c) De la evaluación de los efectos de factores de la técnica de estabilización de suelos para el mejoramiento del terreno, se recomienda incluir el factor tipo de aditivo para su análisis de cuán preponderante es éste.
- d) Del método de estabilización química, se recomienda efectuar el ensayo de “Azul Metileno” del suelo para determinar si existe reacción entre aditivo y suelo.
- e) De las canteras de material para “Afirmado”, “Base” y “Sub Base”, se recomienda a las instituciones competentes efectuar el control de calidad regularmente.
- f) Del método de medición de la resistencia al corte, se recomienda evaluar una resistencia a largo plazo con un ensayo de compresión triaxial CD.

6.2 Trabajos futuros

- a) Efectos de métodos de estabilización y tipos de suelos adecuados para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de edificios urbanos.
- b) Eficiencia de métodos de estabilización y tipos de suelos adecuados para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla.
- c) Influencia del aditivo Terrazyme en los parámetros de resistencia al corte de suelos granulares mediante ensayos de compresión triaxial CD.
- d) Efectos de los métodos de estabilización, tipos de aditivos y tipos de suelos propicios para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la pampilla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva Hurtado, J. (2009). *Diseño de Cimentaciones*. Lima, Perú: ICG.
- American Petroleum Institute. (2012). *API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage*. Washington D.C.: API Publishing Services.
- Aranda Burckhardt, P. A. (2011). *Diseño de Tanques de acero soldado apoyados sobre suelo para almacenamiento de hidrocarburos*. Lima: Universidad Ricardo Palma.
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación: introducción a la metodología científica* (Sexta edición ampliada y corregida ed.). Caracas, República Bolivariana de Venezuela: Episteme.
- Bentley Communities. (10 de Agosto de 2018). Flexible tank foundation on elastic saturated soil. *Manuals - PLAXIS - GeoStudio | PLAXIS Wiki - Bentley Communities*. Obtenido de <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis>
- Berry, P. (1992). *Mecánica de Suelos*. Bogotá: Mc. Graw Hill.
- Bowles, J. E. (1980-81). *Manual de Laboratorio en la Ingeniería Civil*. Bogotá: Mc. Graw Hill.
- Bowles, J. E. (1982). *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. Mac Graw Hill.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (Fifth Edition ed.). Singapore: McGraww-Hill.
- Carrasco Díaz, S. (2005). *Metodología de la Investigación Científica*. Lima, Perú: San Marcos.
- Ccora Montes, J., & Montenegro Santacruz, H. (2011). *Estudio comparativo del mejoramiento de la base aplicando estabilizadores: emulsión asfáltica, cal y cemento - carretera Cañete- Chupaca: tramo km 152+000 - 158+000*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Chinchay Díaz, L. (2018). *Influencia del aditivo Sika Dust Seal como agente estabilizador de suelos en la trocha carrozable tramo La Serma - Tambillo Jaen, Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.

- Choque Sánchez, H. M. (2012). *Evaluación de aditivos químicos en la eficiencia de las conservación de superficies de rodadura en carreteras no pavimentadas*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería - UNI.
- Cotos Pérez, H. A. (2017). *Informe N°026-2017-MTC/20.6.3/HCP*. Provias Nacional, Lima. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones* (Quinta Edición ed.). México, México: Limusa.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Thomson Learning.
- Das, B. M. (2012). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (Séptima Edición ed.). México: CENGAGE Learning.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (Cuarta edición ed.). México: Cengage Learning Editores.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2019). *Principles of Foundation Engineering* (Cengage Learnig ed.). Boston, United States of America: Ninth edition.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering* (Ninth Edition ed.). Boston, United States of America: Cengage Learning.
- Documento Básico SE-C Seguridad Estructural: Cimientos. (2019). *Código Técnico de la Edificación Documento Básico SE-C Seguridad Estructural: Cimientos*. (V. y. Dirección General de Arquitectura, Ed.) Madrid, España.
- Duzceer, R. (2003). Modificación del Terreno para Tanques de Almacenamiento de Petróleo Utilizando Columnas de Piedra. Recuperado el 10 de julio de 2018, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.698.299>
- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG - 2013 - MTC. (2013). *Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG - 2013* (Ministerio de Transportes y Comunicaciones - MTC ed.). (D. G. Ferrocarriles, Ed.) Lima: El Peruano.
- Fernández Gálvez, H. W. (2017). *Efecto del aditivo Terrazyme en las estabilizaciones de suelos arcillosos de sub rasantes en la zona de expansión de la ciudad de Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.

- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, P. C. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (Primera Edición ed.). Mexico, Mexico: McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Hernandez Sampieri, R., Fernández Collado, R., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición ed.). México: Mc Graw Hill.
- Juaréz Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (Vol. 1). México: Limusa.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de Suelos - Tomo I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (Tercera Edición ed., Vol. Tomo I). México: Limusa.
- Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación* (Segunda edición ed.). México, México: Thomson learning.
- Lambe, W. T. (2004). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
- López Martínez, M. A. (2017). *"Mejoramiento de las Propiedades Físico Mecánicas de los Suelos Arenosos del Sector Pomasqui para Cimentaciones Superficiales y Contrapisos, mediante el Uso del Cemento Tipo MH"*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Manual de Ensayo de Materiales MTC. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. (D. G. Ferrocarriles, Ed.) Lima, Perú: El Peruano.
- Maza Palop, R. M. (2020). *Análisis de tipologías de cimentación y propuestas de mejora de terreno para la implantación de un parque de tanques API de almacenamiento*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla. Recuperado el 2020
- Nieto Leal, A., Ruiz Blanco, E. F., & Camacho Tauta, J. F. (05 de Noviembre de 2009). Determinación de parámetros para los modelos elástoplasticos Mohr-Coulomb y Hardening soil en suelos arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 75-91. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242009000200007
- Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2018). *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis* (Quinta Edición ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.

- Oyola Guzman, D., & Vaca Oyola, L. S. (2018). Uso de la teoría de Mohr-Coulomb. *Arquitectura e Ingeniería*, 1-11.
- Peck, T. . (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. Buenos Aires, Argentina: El Ateneo 1973.
- Pestana, J. M. (2018). *Curso avanzado internacional de geotecnia computacional: Introduction to Nonlinear Soil Behavior*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Lima: PUCP.
- Process Industry Practices (PIP). (2005). *PIP STE03020 Guidelines for Tank Foundation Designs*. Austin: The University of Texas at Austin.
- Pusari Quispe, O. A., & Rodríguez Machuca, J. Y. (2020). *Estudio experimental de mejoramiento de las propiedades de resistencia al corte de un suelo expansivo con polvo de vidrio reciclado y fibras de polipropileno en la ciudad de Talara departamento de Piura*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Quispe Chambi, A. (2015). *Incidencia de la adición de aditivo perma-zyme 22x en suelos con alto contenido de finos para la construcción de carreteras de tipo afirmado*. Juliaca: Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez .
- Ravines Merino, M. A. (2010). *Pruebas con un Producto Enzimático como Agente Estabilizador de Suelos para Carreteras*. Piura: Universidad de Piura.
- Real Academia Española. (2022). *Diccionario de la real academia española*. Recuperado el 15 de junio de 2022, de <https://dle.rae.es/estabilizaci%C3%B3n?m=form>
- Reglamento Nacional de Edificaciones: Norma E. 050. (2019). *Suelos y Cimentaciones*. Lima, Perú: Diario El Peruano.
- Restrepo, J. (19-21 de Noviembre de 2007). Código API 650 y 653: Diseño, Montaje y Contrucción de Tanques Soldados de Acero. *ELITE TRAINING*, (pág. 1). Bogotá D.C Colombia. Recuperado el 19-21 de Noviembre de 2007, de Elitetraining@cablenet.co: <https://hidrocarburos.com.co/>
- Saéz, E. (20 de Enero de 2010). Fundamentos de Geotécnia IC-1603. (Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnia). Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado el 05 de junio de 2018, de https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/25434/FUNDAMENTOS_DE_GEOTECNIA_SAEZ_%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Sección Suelos y Pavimentos - MTC. (2014). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. (D. G. Ferrocarriles, Ed.) Lima, Perú: El Peruano.
- Stasoil S.A.C. (2003). *Terrazyme Catalizador natural liquido para la construcción, mantenimiento, rehabilitación de carreteras y caminos en general*. Lima: Stasoil S.A.C. Tecnología de punta.
- Suárez, J. (2009). *EROSIÓN.COM.CO*. (G. E. Geotécnica, Editor) Obtenido de Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico: <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico/>
- Terzagui, K., & Peck, R. B. (1978). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica* (Segunda Edición ed.). Barcelona, España: El Ateneo.
- Thusyanthan, I., & Enriquez, H. (2022). *Guía de diseño para evaluar los asentamientos de tanques de almacenamiento y los criterios aceptables de asentamiento de tanques*. Sydney, Australia: Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2022. Recuperado el 15 de Agosto de 2022, de <https://www.researchgate.net/publication/360345415>
- Ugaz Palomino, R. M. (2006). *Estabilización de Suelos y su Aplicación en el Mejoramiento de sub rasante*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería - UNI.
- UNALM / FIA / DOT-DS Laboratorio de Mecánica de Suelos. (2017). *Informe Técnico: Estudio Geológico, Geodinámico, Hidrogeológico y Geotécnico del Proyecto: Construcción de Nuevas Esferas de GLP y Almacenamiento de Turbo y Residual de propiedad de Refinería la Pampilla – Ventanilla, Callao*. Lima.
- UNALM/FIA/DOT-C Laboratorio de Mecánica de Suelos. (2017). *Informe técnico N°106/11/16: Estudio geofísico*. Lima.
- Vera Ibañez, R. S., & Villanueva Collantes, F. N. (2021). *Análisis de estabilización química de suelos arcillosos mediante Terrazyme en la carretera Cachipampa - Sartimbamba, Sánchez Carrión, La libertad. 2021*. Trujillo: Universidad César Vallejo.
- Whitlow, R. (1994). *Fundamentos de Mecánica de Suelos*. México: CECSA.
- Whitman, L. . (1972). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa 1996.

ACRÓNIMOS

AASHTO	: Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte.
ANOVA	: Análisis de varianza.
API	: Instituto americano del Petróleo.
ASTM	: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.
CAD	: Diseño Asistido por Computadora.
CBR	: Relación de Soporte de California.
CPT	: Ensayo de Penetración de Cono.
CPU	: Unidad central de procesamiento.
DIN	: Instituto Alemán de Normalización.
DSM	: Densidad seca máxima.
EEMUA	: Asociación de Usuarios de Materiales y Equipos de Ingeniería.
EMS	: Estudios de mecánica de suelos.
GI	: Grupo de investigación.
GE	: Grupo experimental.
GC	: Grupo de control.
GLP	: Gas Licuado de Petróleo.
IP	: Índice de plasticidad.
ISO	: Organización Internacional de Normalización.
LL	: Límite Líquido.
LP	: Límite plástico
MBbl	: Mil barriles de petróleo.
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
NTP	: Norma técnica peruana.

P	: Pozo
PIP	: Prácticas de la Industria de Procesos.
pH	: Potencial de Hidrógeno.
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
SPT	: Ensayo de penetración estándar.
Triaxial UU	: Ensayo de compresión triaxial no drenada no consolidada.
Triaxial CU	: Ensayo de compresión triaxial no drenada consolidada.
Triaxial CD	: Ensayo de compresión triaxial drenada consolidada.
Wop	: Porcentaje de humedad óptima.
UNALM	: Universidad Nacional Agraria La Molina.
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería.
VRU	: Unidad de Recuperación de Vapor.
3D	: Tres dimensiones.
2D	: Dos dimensiones.
N.F.	: Napa freática.

SÍMBOLOS

δ	: Asentamiento diferencial.
ΔH	: Asentamiento total.
S_p	: Consolidación primaria.
S_s	: Consolidación secundaria.
S_i	: Asentamiento elástico.
S_T	: Asentamiento total.
D_t	: Diámetro del tanque.
H_t	: Altura del tanque.
D_e	: Diámetro del espécimen.
D_a	: Diámetro adicional.
H_e	: Altura del espécimen.
H	: Profundidad de estrato de suelo del terreno.
R	: Radio del tanque.
B	: Ancho de zapata.
D_f	: Profundidad de desplante de cimentación.
γ_{unsat}	: Peso específico no saturado.
γ_{sat}	: Peso específico saturado.
γ	: Peso específico del suelo.
γ_d	: Densidad de suelo seco
$E_{ref(50)}$	: Módulo de Young secante.
E_s	: Módulo de elasticidad (módulo de Young).
K_s	: Módulo de reacción de la subrasante.
K_s	: Coef. de punzonamiento, es una función de q_2/q_1 y ϕ'_1 (Ec. 17)

ν	: Relación de Poisson (μ).
G	: Módulo de corte.
E_{oed}	: Módulo edometrico.
ψ	: Ángulo de dilatancia.
mab	: Muestra alterada en bolsa.
σ	: Esfuerzos normal.
σ_1	: Esfuerzo normal principal mayor.
σ_3	: Esfuerzo normal intermedio (presión lateral).
$\Delta\sigma$	: Esfuerzo desviador.
ε	: Deformación unitaria.
ϵ_s	: Deformación unitaria.
τ	: Resistencia cortante.
S_u	: Resistencia al corte no drenado.
ϕ	: Ángulo de fricción interna.
C	: Cohesión aparente.
ρ	: Densidad.
W	: Humedad natural.
K_x	: Coeficiente de permeabilidad en el eje x.
K_y	: Coeficiente de permeabilidad en el eje y.
q_{adm}	: Capacidad de carga admisible.
q_u	: Capacidad de carga última.
q_b	: Capacidad de carga última de estrato inferior débil (q_2)
q_t	: Capacidad de carga última de estrato superior fuerte (q_1)
ϵ_v	: Deformación axial.
ϵ_L	: Deformación de expansión lateral.

GLOSARIO

- **Aditivo:** Producto químico ó mineral que modifica una ó más propiedades de un material ó mezcla de éstas.
- **Ángulo de fricción interna:** El ángulo de fricción del material ϕ es el valor límite del ángulo de inclinación α para que se pierda el equilibrio del bloque.
- **CBR:** Índice de capacidad de soporte de California (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, sub base y base de pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad (NTP 339.145, 1999).
- **Cohesión de suelos:** Es el efecto de la atracción de partículas independientemente del esfuerzo normal, pero depende considerablemente del contenido de agua y de la velocidad de deformación (Bowles J. E., 1982, pág. 365).
- **Compactación:** Es la densificación de los suelos mediante la aplicación de energía mecánica. Puede implicar también la modificación del contenido de humedad y de la gradación de suelo, acoplados con energía vibratoria. (Bowles J. E., 1982, pág. 185).
- **Contenido de humedad.** La humedad o contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada como porcentaje, del peso de agua en una masa dada de suelo, al peso de las partículas sólidas (NTP 339.127, 1999).
- **Enzimas:** Son moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas hasta hacerlas instantáneas o casi instantáneas. Son catalizadores altamente específicos (Ravines Merino, 2010, pág. 18).
- **Estabilización:** Acción y efecto de estabilizar (Real Academia Española, 2022).
- **Estabilizar:** Dar a algo estabilidad (Real Academia Española, 2022).
- **Estabilidad:** Cualidad de estable (Real Academia Española, 2022).
- **Estable:** Del lat. *stabĭlis*. Que mantiene o recupera el equilibrio (Real Academia Española, 2022).
- **Granulometría.** Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis granulométrico (ASTM C 136).
- **Peso específico:** Es la relación entre el peso de la sustancia y su volumen.

- **Peso específico relativo:** Se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua, a 4°, destilada y sujeta a una atmósfera de presión. (Juaréz Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 53).
- **Plasticidad:** Se define la plasticidad como la propiedad de un material, por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin deformarse ni agrietarse. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 127).
- **Proctor modificado.** El método está basado en la determinación de las densidades secas de varias probetas, compactadas en idénticas condiciones, pero con contenidos de humedad diferentes. Para cada contenido de humedad se alcanza una determinada densidad, de manera que estos pares de valores, representados en coordenadas cartesianas, definen la relación buscada (NTP 339.141, 1999).
- **Los efectos principales:** “Son comparaciones entre los niveles de un factor promediados para todos los niveles de otro factor” (Kuehl, 2001).
- **Los efectos simples:** “son las comparaciones entre los niveles de un factor a un solo nivel de otro” (Kuehl, 2001).
- **Los efectos de interacción:** “Son los que miden las diferencias entre los efectos simples de un factor a diferentes niveles de otro” (Kuehl, 2001).

ANEXOS

7.1 Constancia de certificado de Laboratorio de Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN



LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

CONSTANCIA

El que suscribe Ing. Carlos Bravo Aguilar, Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

CERTIFICA

Que el Sr. Bachiller en ingeniería Civil **Carlos Falconi Oré**, identificado con DNI N° 42490581, ha ejecutado los ensayos de laboratorio de peso específico, análisis granulométrico, límite de consistencia, contenido de humedad, proctor modificado, ensayos CBR y ensayos de compresión triaxial UU para el proyecto de investigación denominado: **“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA”** durante la fase del planteamiento y ejecución de la Tesis de investigación en los períodos de los años 2017, 2018 y la fase de culminación definitiva en el año 2022.

El presente certificado se suscribe para los fines que el interesado crea conveniente.

La Molina, 26 de diciembre del 2022

Atentamente;



Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Agrícola

7.2 Informe técnico del MTC del uso de material de suelo granular



Año del Buen Servicio al Ciudadano

PROVIAS NACIONAL
JEFATURA DE GESTION DE ESTUDIOS
UNIDAD GERENCIAL DE ESTUDIOS

12 JUL 2017

INFORME N° 026-2017-MTC/20.6.3/HCP

AL : ING. LIDIA MERCEDES MEJIA ECHEANDIA
Jefe de Gestión de Estudios III – Zona Sur.

DE : ING. HUGO A. COTOS PÉREZ
Especialista en Suelos y Pavimentos.

ASUNTO : Atención de Documento – MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE SISTEMAS DE SUELOS CON AFIRMADO PARA CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN LA ZONA DE LA PAMPILLA.

REFERENCIA : Solicitud s/n (E-71682-2017/SEDCEN)

FECHA : Lima, 11 de julio del 2017

REGISTRO: *[Firma]* HORA: 7:50

Me dirijo a Ud., en atención al asunto de la referencia, para informar luego de efectuada la revisión de la documentación remitida con Hoja de Trámite E-71682-2017/SEDCEN, lo siguiente:

1.0 ANTECEDENTES

- GLOSARIO DE TERMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL, del MTC.
- MANUAL DE CARRETERAS: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN (EG-2013), del MTC.

2.0 ANÁLISIS

2.1 Con documento adjunto a la Hoja de Trámite se solicita información sobre una base de datos de referencia de certificación de calidad de las principales canteras de Material de Afirmado en la ciudad de Lima con la finalidad de dar una mejor acreditación y elección del tipo de afirmado a utilizar en el proyecto de investigación que tiene por Título: MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE SISTEMAS DE SUELOS CON AFIRMADO PARA CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN LA ZONA DE LA PAMPILLA.

2.2 La Unidad Gerencial de Estudios de PROVIAS NACIONAL (UGE-PVN), desarrolla estudios de rehabilitación y/o mejoramiento y/o construcción en carreteras que se encuentran integrando las Rutas Nacionales, cuyas soluciones establecidas son para un periodo de vida útil de 20 años y corresponden a un pavimento flexible o rígido.

Los proyectos desarrollados por la UGE-PVN establecen soluciones (periodo de vida útil= 20 años), que no contemplan el uso de material de "Afirmado", ya que éstas se emplean en "Carreteras No Pavimentadas" cuya superficie de rodadura está conformado por gravas o afirmados, suelos estabilizados o terreno natural. Cabe señalar que una "Carretera Pavimentada" es una vía cuya superficie de rodadura está conformada por mezcla bituminosa (flexible) o de concreto Portland (rígida).

Así mismo el MANUAL DE CARRETERAS: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN (EG-2013), que es documento normativo de uso obligatorio en los proyectos del MTC, se indica en su "Sección 301 AFIRMADOS", que el material de Afirmado se utilizará como superficie de rodadura en Carretera No Pavimentada.

2.3 Las capas granulares y/o estructurales empleados en "Carreteras Pavimentadas", de proyectos desarrollados cerca de la ciudad de Lima, corresponden principalmente a: Terraplenes, Subbase Granular, Base Granular, Concreto Asfáltico en Caliente, Concreto Hidráulico principalmente, cuyos análisis de materiales de canteras se encuentran en los proyectos siguientes:

- "ESTUDIO DE MANTENIMIENTO PERIODICO DEL PUENTE LOS ANGELES. DISTRITOS DE CHACLACAYO – CHOSICA, DEPARTAMENTO DE LIMA"
 - Cantera CARAPONGO, Uso: Sub-Base, Base, Fabricación de Mezclas Asfálticas en Caliente y Concretos Hidráulicos.
- ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO "OBRAS EN ZONAS VULNERABLES ANTE FENOMENOS DE GEODINAMICA EXTERNA, DE LA RED VIAL NACIONAL, RUTA PE-22 CARRETERA CENTRAL, TRAMO: PUENTE LOS ANGELES – PUENTE RICARDO PALMA"
 - Cantera LA GLORIA, Uso: Terraplén, Rellenos, Mejoramiento, Material Filtrante, Sub-Base, Base, Mezcla Asfáltica, Concreto Hidráulico.



Pág. 1 de 2

www.proviasnac.gob.pe

Jirón Zorritos 1203
Lima, Lima 01 Perú
(511) 615-7800



PERÚ

Ministerio
de Transportes
y Comunicaciones

"Año del Buen Servicio al Ciudadano"

- Cantera JICAMARCA (UNICON), Uso: Terraplén, Rellenos, Mejoramiento, Material Filtrante, Sub-Base, Base, Mezcla Asfáltica, Concreto Hidráulico
- ESTUDIO DEFINITIVO PARA LA REHABILITACION Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA: LIMA – CANTA – LA VIUDA – UNISH, TRAMO: LIMA – CANTA.
 - Cantera "TRAMEQ", Uso: Piedra para Mezcla Asfáltica en Caliente de Superficie
 - Cantera "RIO SECO", Uso: Relleno, Subbase Granular, Base Granular, Mezcla Asfáltica en Caliente de Superficie, Mezcla de Concreto de Cemento Portland.
 - Cantera "INVERSIONES MINERA SAN JUAN", Uso: Relleno, Subbase Granular, Base Granular, Mezcla Asfáltica en Caliente de Superficie, Mezcla de Concreto de Cemento Portland.
 - Cantera "LETICIA", Uso: Relleno, Subbase Granular, Base Granular, Piedra para Mezcla Asfáltica en Caliente de Superficie, Piedra para Mezcla de Concreto de Cemento Portland.
 - Cantera "40+500", Uso: Relleno, Subbase Granular.
 - Cantera "64+500", Uso: Piedra para Mezcla Asfáltica en Caliente de Superficie, Piedra para Mezcla de Concreto de Cemento Portland.

2.4 De considerar propicio como parte del trabajo de investigación antes citado, se debe analizar la posibilidad del empleo de otro tipo de material (Ejemplo: Terraplén, Sub-Base Granular, Base Granular), que cumplan las mismas funciones geotécnicas del material de Afirmado en cimentaciones superficiales.

2.5 Existen otras entidades que han desarrollado estudios con material de Afirmado y también pueden ser consultados, tales como:

- PROVIAS DECENTRALIZADO, quienes también desarrollan sus proyectos en "Carreteras No Pavimentadas".
- DIRECCION DE ESTUDIOS ESPECIALES del MTC, que con sus laboratorios de ensayos de materiales analizan los diversos agregados de fuentes empleadas en obras viales.

3.0 CONCLUSIONES

- La Unidad Gerencial de Estudios de PROVIAS NACIONAL (UGE-PVN), desarrolla sus proyectos de Carreteras Pavimentadas sobre rutas Nacionales (vida útil= 20 años), los cuales no consideran el empleo de material de Afirmado, ya que éstas se consideran como parte de la solución en "Carreteras No Pavimentadas".
- De considerarlo procedente dentro de los trabajos de investigación se deben desarrollar los análisis para el empleo de material de: Terraplén, Sub-Base Granular, Base Granular, para los propósitos propuestos de un material de Afirmado en cimentaciones superficiales, ya que existen antecedente de estudios de canteras que han sido desarrolladas para la pavimentación de las vías nacionales en la UGE-PVN.
- Existen otras Entidades como PROVIAS DECENTRALIZADO y DIRECCIÓN DE ESTUDIOS ESPECIALES del MTC, donde el material de Afirmado ha sido estudiado en los diversos proyectos de carreteras.

Es cuanto se informa para conocimiento y fines.

Atentamente,



ING. HUGO A. COTOS PÉREZ
Especialista en Suelos y Pavimentos
CIP N° 96383

Cc:
Archivo

Pág. 2 de 2

www.proviasnac.sob.pe

Jirón Zorritos 1203
Lima, Lima 01 Perú
(511) 615-7800

7.3 Ensayos estándares realizados



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y

DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

DOT-C-LMS 03/2017

Solicitante : Carlos Falconi Oré

Calicata : C - 04'

Proyecto de Tesis : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

Muestra : Mab

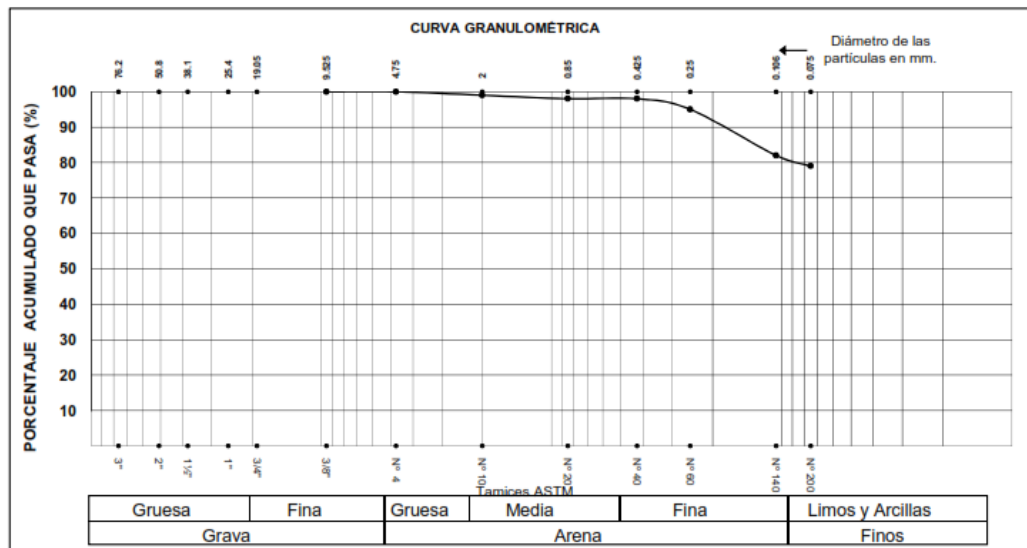
Ubicación : DISTRITO DE VENTANILLA, PROVINCIA DEL CALLAO,
DEPARTAMENTO DE LIMA

Profundidad : 1.00 - 1.50 m

Fecha : La Molina, 5 de junio de 2017

Responsable : Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi C

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA NTP 339.129 (ASTM D4318) / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	PORCENTAJE QUE PASA (%)	Límite líquido (%)	34.4
			Límite plástico (%)	22.08
			Índice plástico (%)	12.32
			Límite de contracción (%)	-
3"	76.20		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
2"	50.80		Coefficiente de:	
1 1/2"	38.10		-Uniformidad	
1"	25.40		-Curvatura	
3/4"	19.05		Material:	
3/8"	9.525	100	-Grava	0
Nº 4	4.750	100	-Arena	21
Nº 10	2.000	99	-Finos	79
Nº 20	0.850	98	Clasificación:	
Nº 40	0.425	98	-AASHTO	A-6
Nº 60	0.250	95	-SUCS	CL con arena
Nº 140	0.106	82	Nombre de grupo:	
Nº 200	0.075	79	CONTENIDO DE HUMEDAD NTP 339.127 (ASTM D2216)	
			Humedad natural (%)	13.08



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

Ing. Hermes Valdivia Aspícueta
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS
 DOT-C-LMS 03/2017

Solicitante : Carlos Falconi Oré

Proyecto de Tesis : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

Muestra : Material granular procesado de préstamo

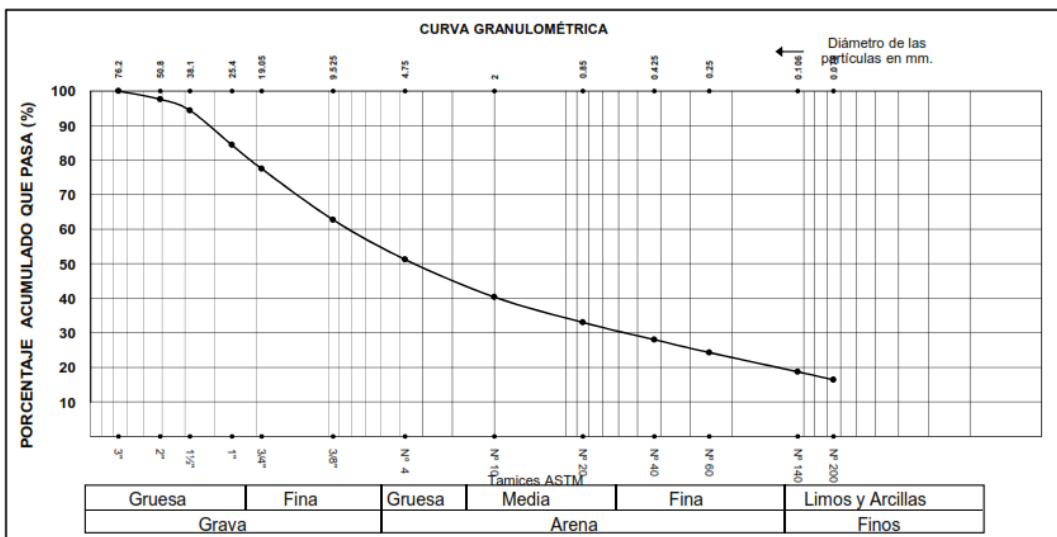
Ubicación : DISTRITO DE VENTANILLA, PROVINCIA DEL CALLAO, DEPARTAMENTO DE LIMA

Profundidad : -

Fecha : La Molina, 22 de julio de 2017

Responsable : Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA NTP 339.129 (ASTM D4318) / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	PORCENTAJE QUE PASA (%)	Límite líquido (%)	19.97
			Límite plástico (%)	16.92
			Índice plástico (%)	3.05
			Límite de contracción (%)	-
3"	76.20	100	Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
2"	50.80	98	Coeficiente de :	
1 1/2"	38.10	94	-Uniformidad	
1"	25.40	84	-Curvatura	
3/4"	19.05	78	Material :	
3/8"	9.525	63	-Grava %	49
Nº 4	4.750	51	-Arena %	35
Nº 10	2.000	40	-Finos %	16
Nº 20	0.850	33	Clasificación :	
Nº 40	0.425	28	-AASHTO	A-1-b
Nº 60	0.250	24	-SUCS	GM con arena
Nº 140	0.106	19	Nombre de grupo:	
Nº 200	0.075	16	CONTENIDO DE HUMEDAD NTP 339.127 (ASTM D2216)	
			Humedad natural (%)	2.57



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta
 Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR-LMS 220/2014

ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG

NTP. 339.129 (ASTM D4318)

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ
PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.

CANTERA : Suelo mezclado (C-07,C-03, C-04 y C-06)

Grupo: Piloto

MUESTRA : Mab (suelo natural)

PROFUNDIDAD : 1.50 m @ 2.50 m

FECHA : lunes, 8 de mayo de 2017

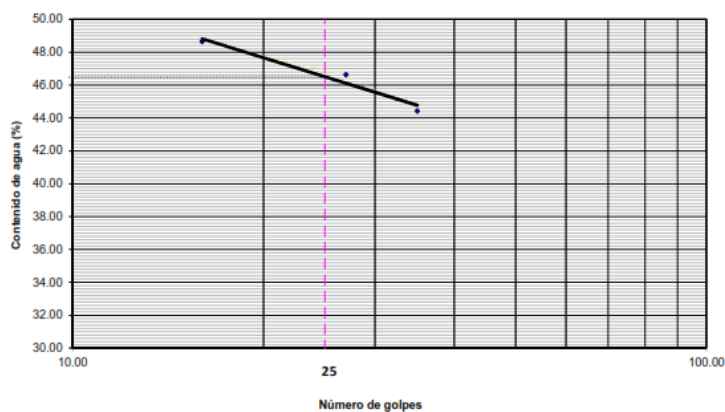
Responsable: Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

LÍMITE LÍQUIDO

ENSAYO	NUMERO DE GOLPES	PESO TARA (gr.)	PESO TARA +SUELO HUMEDO (gr.)	PESO TARA +SUELO SECO (gr.)	PESO DE AGUA (gr.)	PESO DE SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	16.00	6.84	25.60	20.00	5.60	13.16	42.55
2	28.00	13.34	30.92	25.88	5.04	12.54	40.19
3	32.00	5.41	24.45	18.89	5.56	13.48	41.25

LÍMITE PLÁSTICO

ENSAYO	MASA DEL VIDRIO (gr.)	MASA DE VIDRIO +SUELO HUMEDO (gr.)	MASA DE VIDRIO MAS SUELO SECO (gr.)	MASA DE AGUA (gr.)	MASA DEL SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	6.51	17.38	15.77	1.61	9.26	17.39
2	6.83	17.33	15.54	1.79	8.71	20.55



LL = 46.40%

LP = 18.97%

IP = 27.43%

ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR-LMS 220/2014

ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG

NTP. 339.129 (ASTM D4318)

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ

PROYECTO DE : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES

TESIS : SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.

CANTERA : CALICATA N° 04'

Grupo : Grupo de control (GC)

MUESTRA : Mab (Suelo Natural)

PROFUNDIDAD : 1.50 m @ 2.50 m

FECHA : sábado, 19 de agosto de 2017

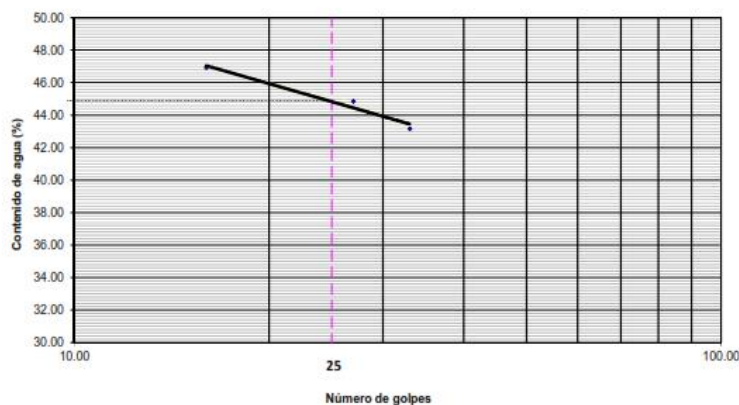
Responsable : Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

LÍMITE LÍQUIDO

ENSAYO	NUMERO DE GOLPES	PESO TARA (gr.)	PESO TARA +SUELO HUMEDO (gr.)	PESO TARA +SUELO SECO (gr.)	PESO DE AGUA (gr.)	PESO DE SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	16.00	6.72	36.49	26.98	9.51	20.26	46.94
2	27.00	6.25	25.95	19.85	6.10	13.60	44.85
3	33.00	8.14	35.80	27.46	8.34	19.32	43.17

LÍMITE PLÁSTICO

ENSAYO	MASA DEL VIDRIO (gr.)	MASA DE VIDRIO +SUELO HUMEDO (gr.)	MASA DE VIDRIO MAS SUELO SECO (gr.)	MASA DE AGUA (gr.)	MASA DEL SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	5.99	9.23	8.64	0.59	2.65	22.26
2	5.18	9.34	8.51	0.83	3.33	24.92
3	8.66	14.83	13.67	1.16	5.01	23.15



LL =	44.80%
LP =	23.45%
IP =	21.35%

ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR-LMS 220/2014

ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG

NTP. 339.129 (ASTM D4318)

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ

PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES
DE TESIS : SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.

CANTERA : CALICATA N° 04'

Grupo : GE-01

MUESTRA : Mab (Suelo natural)

PROFUNDIDAD : 0.00 - 1.50 m

FECHA : lunes, 5 de junio de 2017

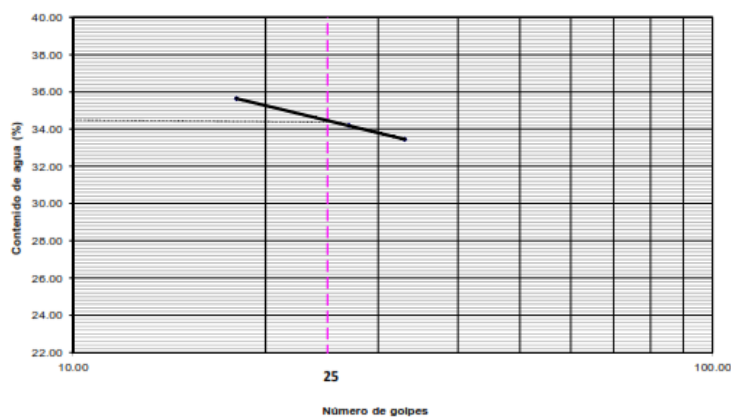
Responsable : Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

LÍMITE LÍQUIDO

ENSAYO	NUMERO DE GOLPES	PESO TARA (gr.)	PESO TARA +SUELO HUMEDO (gr.)	PESO TARA +SUELO SECO (gr.)	PESO DE AGUA (gr.)	PESO DE SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	33.00	5.41	32.86	25.98	6.88	20.57	33.45
2	27.00	17.57	40.61	34.74	5.87	17.17	34.19
3	18.00	6.10	31.98	25.18	6.80	19.08	35.64

LÍMITE PLÁSTICO

ENSAYO	MASA DEL VIDRIO (gr.)	MASA DE VIDRIO +SUELO HUMEDO (gr.)	MASA DE VIDRIO MAS SUELO SECO (gr.)	MASA DE AGUA (gr.)	MASA DEL SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	6.75	19.16	16.90	2.26	10.15	22.27
2	8.84	18.18	16.49	1.69	7.65	22.09
3	13.40	27.33	24.83	2.50	11.43	21.87



LL = 34.40%

LP = 22.08%

IP = 12.32%

ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR-LMS 220/2014

ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG

NTP. 339.129 (ASTM D4318)

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ
PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.

CANTERA : GLORIA

Grupos : GE-02

MUESTRA : Mab (Seleccionada)

PROFUNDIDAD : -

FECHA : lunes, 24 de julio de 2017

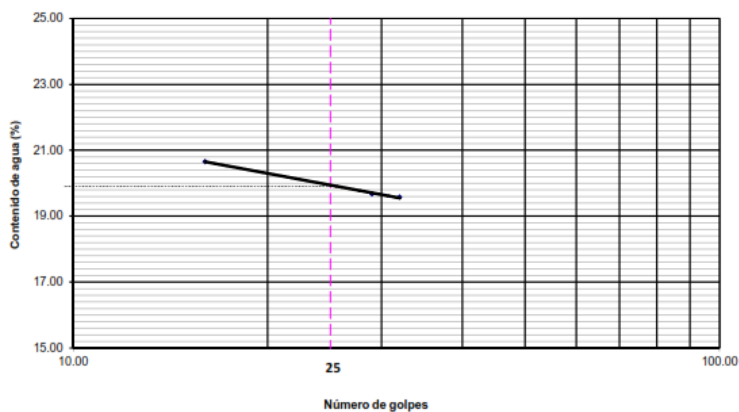
Responsable : Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

LÍMITE LÍQUIDO

ENSAYO	NUMERO DE GOLPES	PESO TARA (gr.)	PESO TARA +SUELO HUMEDO (gr.)	PESO TARA +SUELO SECO (gr.)	PESO DE AGUA (gr.)	PESO DE SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	16.00	8.68	40.28	34.87	5.41	26.19	20.66
2	29.00	6.75	33.33	28.96	4.37	22.21	19.68
3	32.00	6.02	37.90	32.68	5.22	26.66	19.58

LÍMITE PLÁSTICO

ENSAYO	MASA DEL VIDRIO (gr.)	MASA DE VIDRIO +SUELO HUMEDO (gr.)	MASA DE VIDRIO MAS SUELO SECO (gr.)	MASA DE AGUA (gr.)	MASA DEL SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	13.39	29.82	27.51	2.31	14.12	16.36
2	8.16	19.38	17.74	1.64	9.58	17.12
3	5.41	17.28	15.53	1.75	10.12	17.29



LL = 19.90%

LP = 16.92%

IP = 2.98%

ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR-LMS 220/2014

ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG

NTP. 339.129 (ASTM D4318)

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ

PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.

CANTERA : CALICATA N° 04'

Grupo : GE-03

MUESTRA : Mab (Suelo natural+aditivo)

PROFUNDIDAD : 0.00 - 1.50 m

FECHA : miércoles, 21 de junio de 2017

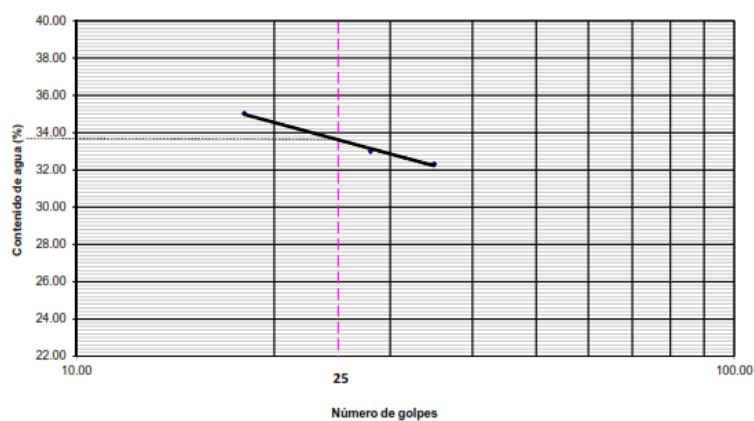
Responsable : Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

LÍMITE LÍQUIDO

ENSAYO	NUMERO DE GOLPES	PESO TARA (gr.)	PESO TARA +SUELO HUMEDO (gr.)	PESO TARA +SUELO SECO (gr.)	PESO DE AGUA (gr.)	PESO DE SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	18.00	5.41	46.23	35.64	10.59	30.23	35.03
2	28.00	13.39	46.08	37.97	8.11	24.58	32.99
3	35.00	6.01	36.10	28.75	7.35	22.74	32.32

LÍMITE PLÁSTICO

ENSAYO	MASA DEL VIDRIO (gr.)	MASA DE VIDRIO +SUELO HUMEDO (gr.)	MASA DE VIDRIO MAS SUELO SECO (gr.)	MASA DE AGUA (gr.)	MASA DEL SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	6.74	29.38	25.31	4.07	18.57	21.92
2	17.56	36.63	33.11	3.52	15.55	22.64
3	8.15	31.71	27.26	4.45	19.11	23.29



LL = 33.60%

LP = 22.61%

IP = 10.99%

ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR-LMS 220/2014

ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG

NTP. 339.129 (ASTM D4318)

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ
PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.

CANTERA : GLORIA

Grupo : GE-04

MUESTRA : Mab (Seleccionada c/. Aditivo)

PROFUNDIDAD : -

FECHA : viernes, 7 de julio de 2017

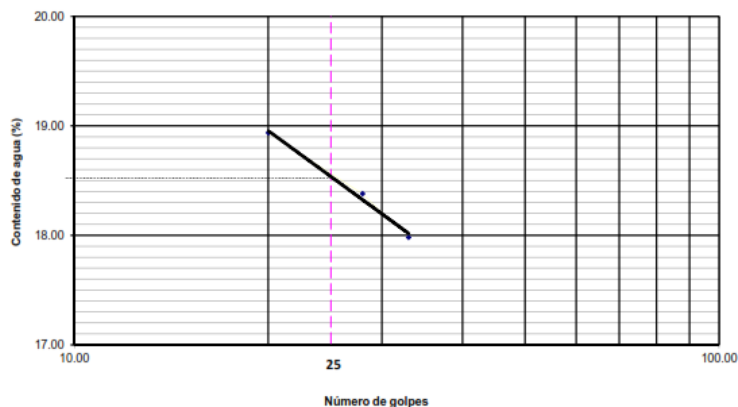
Responsable : Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

LÍMITE LÍQUIDO

ENSAYO	NUMERO DE GOLPES	PESO TARA (gr.)	PESO TARA +SUELO HUMEDO (gr.)	PESO TARA +SUELO SECO (gr.)	PESO DE AGUA (gr.)	PESO DE SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	20.00	5.41	30.91	26.85	4.06	21.44	18.94
2	28.00	13.40	51.40	45.50	5.90	32.10	18.38
3	33.00	17.54	54.94	49.24	5.70	31.70	17.98

LÍMITE PLÁSTICO

ENSAYO	MASA DEL VIDRIO (gr.)	MASA DE VIDRIO +SUELO HUMEDO (gr.)	MASA DE VIDRIO MAS SUELO SECO (gr.)	MASA DE AGUA (gr.)	MASA DEL SUELO SECO (gr.)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	8.66	15.57	14.62	0.95	5.96	15.94
2	6.73	13.76	12.72	1.04	5.99	17.36
3	8.14	16.68	15.46	1.22	7.32	16.67



LL =	18.53%
LP =	16.66%
IP =	1.87%

ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

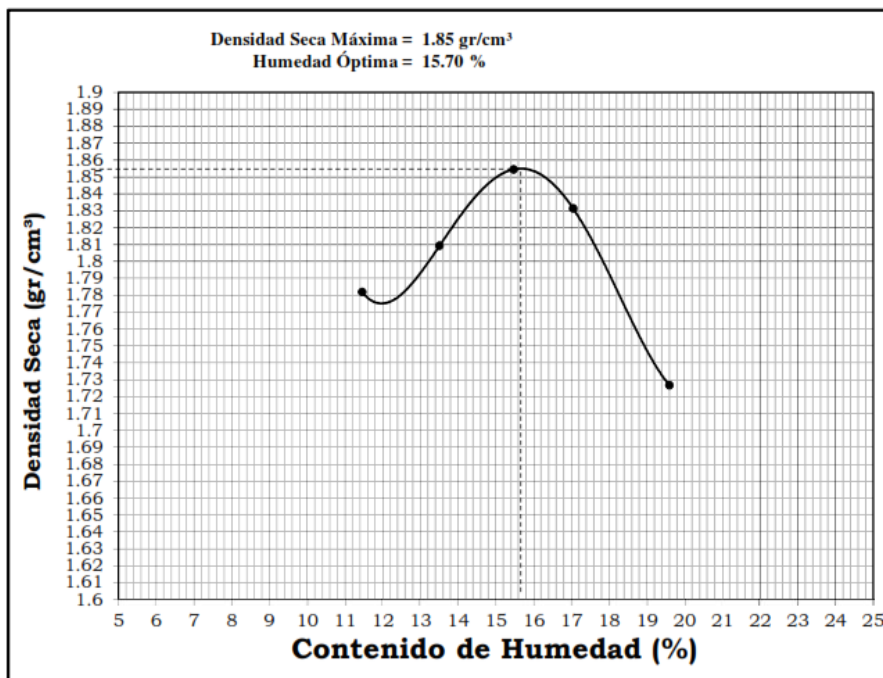


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR NTP 339.141/ MTC E 115 (ASTM D1557) - METODO "A"

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ
PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"
UBICACIÓN : DISTRITO DE VENTANILLA, PROVINCIA DEL CALLAO, DEPARTAMENTO DE LIMA
CALICATA : Varios (C-3, C-4, C-6 y C-7) **Muestra:** Mab de suelo mezclado (suelo equivalente CL)
PROFUNDIDAD (m) : 1.00 - 1.50 m **Grupo:** Ensayo piloto
FECHA : 16 de Mayo del 2017 **Responsable:** Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

PROCTOR MODIFICADO - MTC E 115 "A"					
	8	10	12	14	16
Nº Capa	5	5	5	5	5
Golpes por capa Nº	25	25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo (gr)	6035	6099	6182	6184	6110
Peso de molde (gr)	4155	4155	4155	4155	4155
Peso del suelo húmedo (gr)	1880	1944	2027	2029	1955
Volumen del molde (cm ³)	947	947	947	947	947
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.986	2.054	2.141	2.143	2.065
Densidad seca (gr/cm ³)	1.78	1.81	1.85	1.83	1.73
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo (gr)	351.78	305.70	222.77	254.24	270.3
Tarro + Suelo seco (gr)	318.94	273.85	196.39	222.28	233.3
Peso del Agua (gr)	32.84	31.85	26.38	31.96	36.98
Peso del tarro (gr)	32.41	38.10	25.89	34.84	44.67
Peso del suelo seco (gr)	286.53	235.75	170.50	187.44	188.7
Humedad (%)	11.46	13.51	15.47	17.05	19.60



OBSERVACIONES :

 ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA
 DE SUELOS

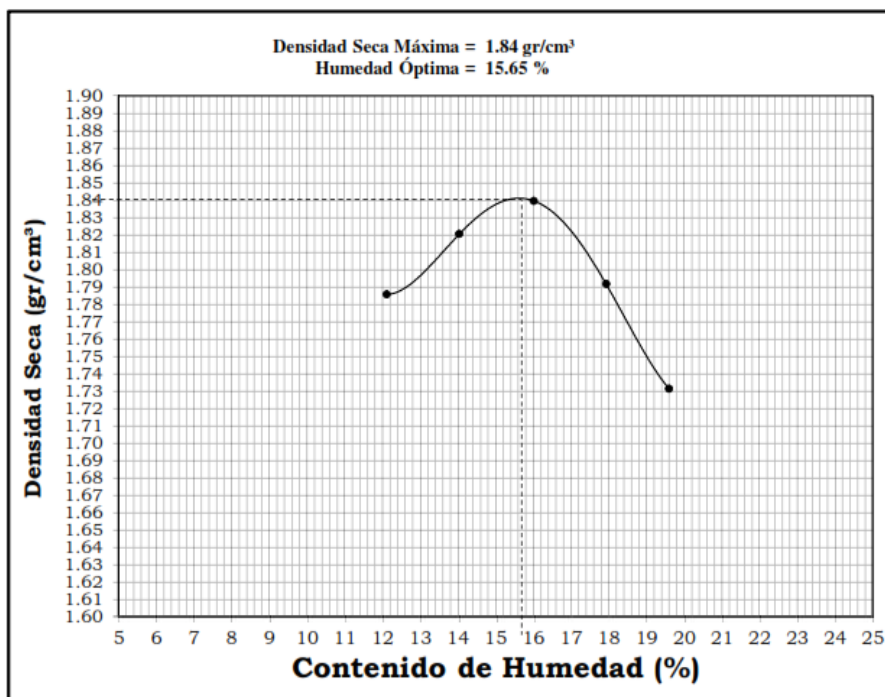


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR NTP 339.141/ MTC E 115 (ASTM D1557) - METODO "A"

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ
PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO
 EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA
 HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"
UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.
CALICATA : Calicata N° 04' **Muestra:** Mab suelo natural (Suelo CH)
PROFUNDIDAD (m) : 1.50 - 2.50 m **Grupo:** Grupo de control GC
FECHA : 03 de Agosto del 2018 **Responsable:** Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

PROCTOR MODIFICADO - MTC E 115 "A"					
	10	12	14	16	18
Nº Capa	5	5	5	5	5
Golpes por capa Nº	25	25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo (gr)	6050	6120	6175	6155	6115
Peso de molde (gr)	4155	4155	4155	4155	4155
Peso del suelo húmedo (gr)	1895	1965	2020	2000	1960
Volumen del molde (cm ³)	947	947	947	947	947
Densidad húmeda (gr/cm ³)	2.002	2.076	2.134	2.113	2.071
Densidad seca (gr/cm ³)	1.79	1.82	1.84	1.79	1.73
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo (gr)	225.58	248.20	287.59	292.40	270.3
Tarro + Suelo seco (gr)	204.80	220.83	252.80	254.84	233.3
Peso del Agua (gr)	20.78	27.37	34.79	37.56	36.98
Peso del tarro (gr)	33.32	25.86	35.52	45.40	44.67
Peso del suelo seco (gr)	171.48	194.97	217.28	209.44	188.7
Humedad (%)	12.12	14.04	16.01	17.93	19.60



OBSERVACIONES :

 ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA
 DE SUELOS

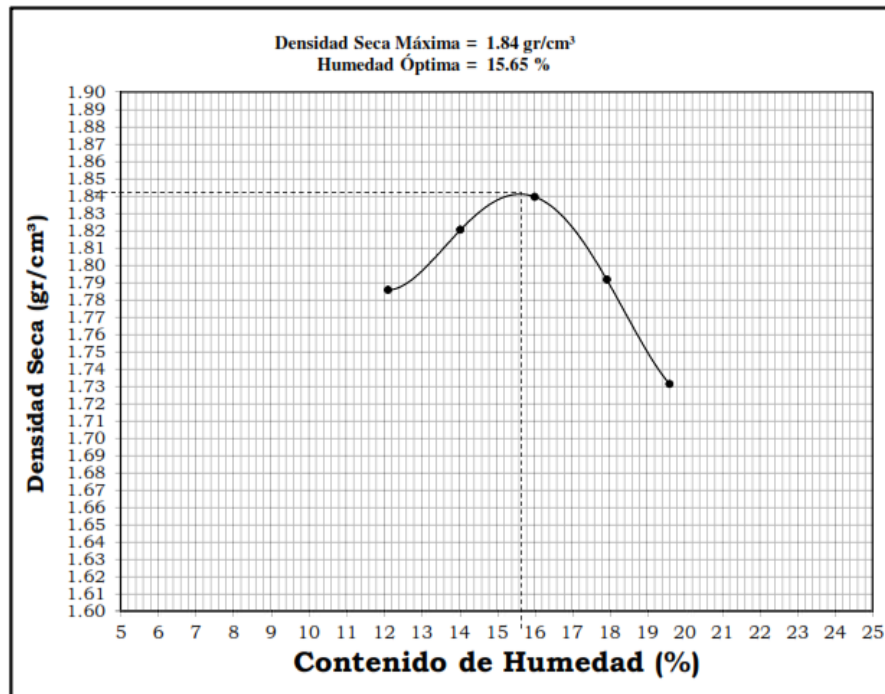


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR NTP 339.141/ MTC E 115 (ASTM D1557) - METODO "A"

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ
PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"
UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.
CALICATA : Calicata N° 04' **Muestra:** Mab suelo natural (Suelo CL)
PROFUNDIDAD (m) : 1.00 - 1.50 m **Grupo:** GE-01
FECHA : 12 de Junio del 2017 **Responsable:** Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

PROCTOR MODIFICADO - MTC E 115 "A"					
	10	12	14	16	18
N° Capa	5	5	5	5	5
Golpes por capa N°	25	25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo (gr)	6050	6120	6175	6155	6115
Peso de molde (gr)	4155	4155	4155	4155	4155
Peso del suelo húmedo (gr)	1895	1965	2020	2000	1960
Volumen del molde (cm ³)	947	947	947	947	947
Densidad húmeda (gr/cm ³)	2.002	2.076	2.134	2.113	2.071
Densidad seca (gr/cm ³)	1.79	1.82	1.84	1.79	1.73
Tarro N°					
Tarro + Suelo húmedo (gr)	225.58	248.20	287.59	292.40	270.3
Tarro + Suelo seco (gr)	204.80	220.83	252.80	254.84	233.3
Peso del Agua (gr)	20.78	27.37	34.79	37.56	36.98
Peso del tarro (gr)	33.32	25.86	35.52	45.40	44.67
Peso del suelo seco (gr)	171.48	194.97	217.28	209.44	188.7
Humedad (%)	12.12	14.04	16.01	17.93	19.60



OBSERVACIONES :

 ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA
 DE SUELOS

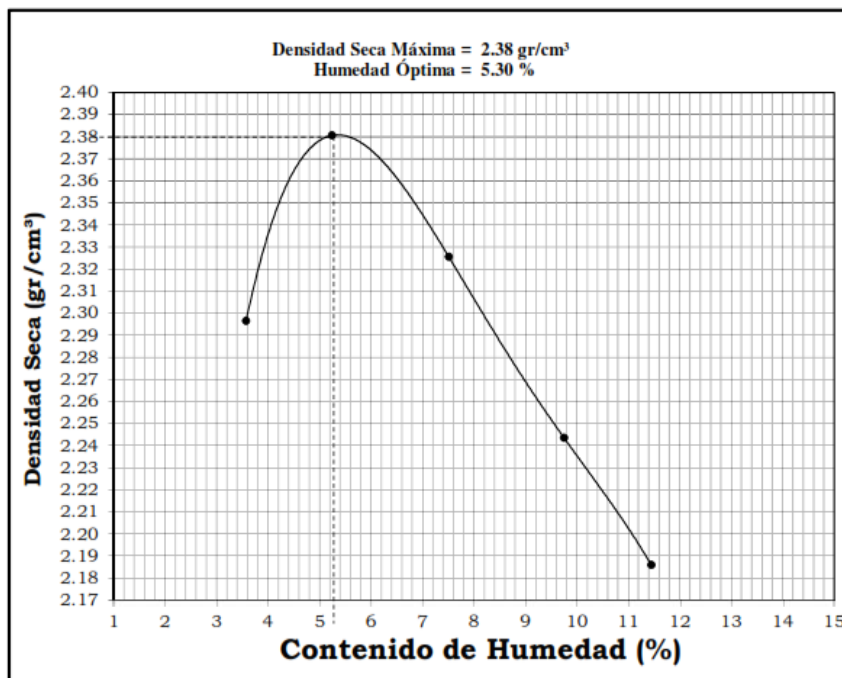


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR NTP 339.141/ MTC E 115 (ASTM D1557) - METODO "C"

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ
PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"
UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.
CALICATA/CANTERA : Gloria : **Muestra:** Mab seleccionada (Suelo GM)
PROFUNDIDAD (m) : ----- **Grupo:** GE-02
FECHA : 1 de Agosto de 2017 **Responsable:** Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

PROCTOR MODIFICADO - MTC E 115 "C"					
	2	4	6	8	10
Nº Capa	5	5	5	5	5
Golpes por capa Nº	56	56	56	56	56
Peso molde + suelo húmedo (gr)	12300	12567	12556	12476	12421
Peso de molde (gr)	7293	7293	7293	7293	7293
Peso del suelo húmedo (gr)	5007	5274	5263	5183	5128
Volumen del molde (cm³)	2105	2105	2105	2105	2105
Densidad húmeda (gr/cm³)	2.379	2.506	2.500	2.462	2.436
Densidad seca (gr/cm³)	2.30	2.38	2.33	2.24	2.19
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo (gr)	296.69	316.46	353.76	365.30	368.4
Tarro + Suelo seco (gr)	287.62	301.97	331.52	335.43	334.0
Peso del Agua (gr)	9.07	14.49	22.24	29.87	34.42
Peso del tarro (gr)	34.06	25.90	35.58	29.26	33.35
Peso del suelo seco (gr)	253.56	276.07	295.94	306.17	300.6
Humedad (%)	3.58	5.25	7.52	9.76	11.45



OBSERVACIONES :

 ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA
 DE SUELOS

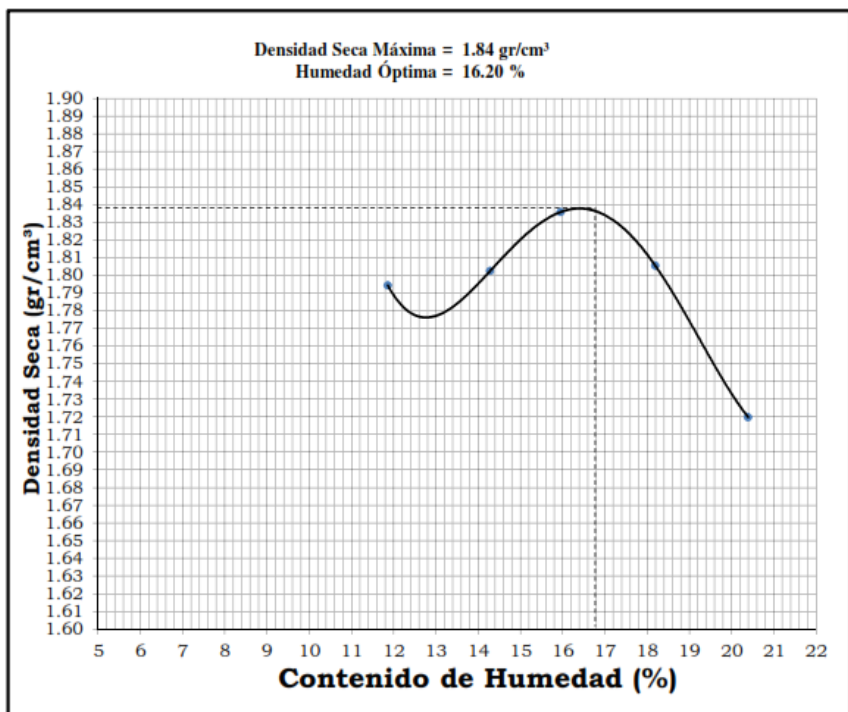


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR NTP 339.141/ MTC E 115 (ASTM D1557)
- METODO "A"

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ
PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO
 EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA
 HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"
UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.
CALICATA/CANtera : Calicata N° 04' **Muestra:** Mab suelo natural (Suelo CL c/
 Aditivo)
PROFUNDIDAD (m) : 1.00 - 1.50 m **Grupo:** GE-03
FECHA : 20 de Junio del 2017 **Responsable:** Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

PROCTOR MODIFICADO - MTC E 115 "A"					
	8	10	12	14	16
Nº Capa	5	5	5	5	5
Golpes por capa Nº	25	25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo (gr)	6055	6105	6170	6175	6115
Peso de molde (gr)	4155	4155	4155	4155	4155
Peso del suelo húmedo (gr)	1900	1950	2015	2020	1960
Volumen del molde (cm ³)	947	947	947	947	947
Densidad húmeda (gr/cm ³)	2.007	2.060	2.129	2.134	2.071
Densidad seca (gr/cm ³)	1.79	1.80	1.84	1.81	1.72
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo (gr)	256.38	306.93	266.91	261.76	312.8
Tarro + Suelo seco (gr)	231.94	272.49	234.87	226.84	270.6
Peso del Agua (gr)	24.44	34.44	32.04	34.92	42.26
Peso del tarro (gr)	25.89	31.42	34.04	34.89	63.34
Peso del suelo seco (gr)	206.05	241.07	200.83	191.95	207.2
Humedad (%)	11.86	14.29	15.95	18.19	20.39



OBSERVACIONES :

 ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA
 DE SUELOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR NTP 339.141/ MTC E 115 (ASTM D1557)
- METODO "C"

SOLICITANTE : CARLOS FALCONI ORÉ

PROYECTO DE TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO
 EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA
 HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"

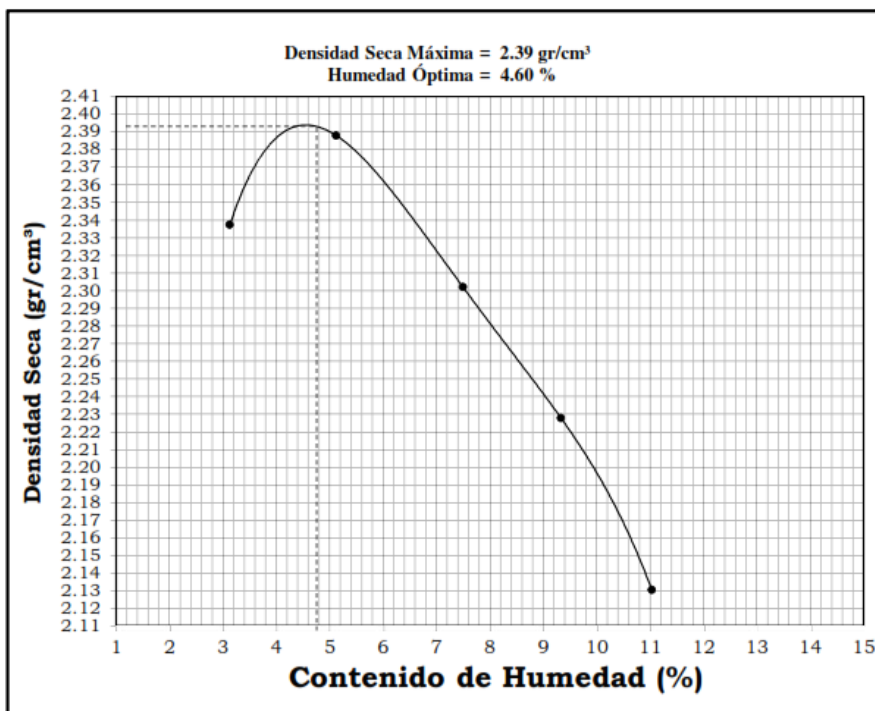
UBICACIÓN : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.

CALICATA/ CANTERA : Gloria **Muestra:** Mab seleccionada (Suelo GM c/. Aditivo)

PROFUNDIDAD (m) : ----- **Grupo:** GE-04

FECHA : 09 de agosto del 2017 **Responsable:** Bachiller Ing. Civil Carlos Falconi Oré

PROCTOR MODIFICADO - MTC E 115 "C"					
	2	4	6	8	10
Nº Capa	5	5	5	5	5
Golpes por capa Nº	56	56	56	56	56
Peso molde + suelo húmedo (gr)	12367	12577	12502	12420	12272
Peso de molde (gr)	7293	7293	7293	7293	7293
Peso del suelo húmedo (gr)	5074	5284	5209	5127	4979
Volumen del molde (cm ³)	2105	2105	2105	2105	2105
Densidad húmeda (gr/cm ³)	2.411	2.510	2.475	2.436	2.365
Densidad seca (gr/cm ³)	2.34	2.39	2.30	2.23	2.13
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo (gr)	299.65	367.49	364.08	362.61	384.3
Tarro + Suelo seco (gr)	291.63	352.66	341.17	334.56	349.0
Peso del Agua (gr)	8.02	14.83	22.91	28.05	35.28
Peso del tarro (gr)	35.61	63.32	35.63	34.03	29.27
Peso del suelo seco (gr)	256.02	289.34	305.54	300.53	319.7
Humedad (%)	3.13	5.13	7.50	9.33	11.04



OBSERVACIONES :

 ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
 JEFE DEL LABORATORIO DE MECANICA
 DE SUELOS

7.4 Ensayos de índice de calidad de soporte CBR realizados



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y

DESARROLLO SOSTENIBLE

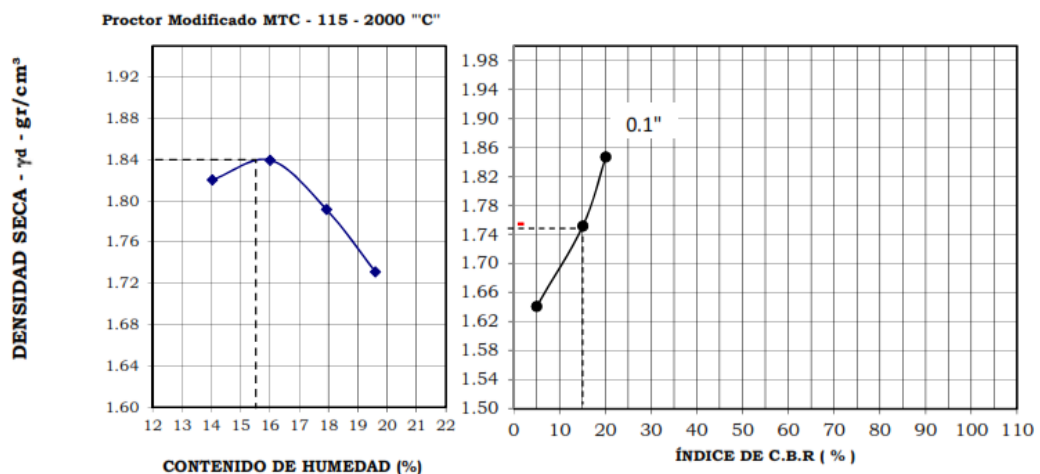
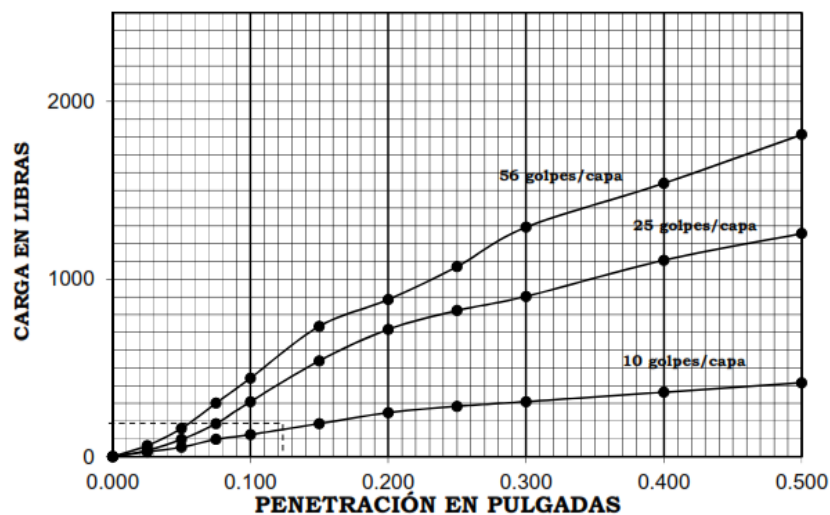
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE C.B.R. NTP 339.175:2002 (ASTM D - 1883)

Solicitante :	CARLOS FALCONI ORÉ	Expediente:	PROYECTO DE TESIS
Proyecto :	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación :	Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.		
Muestra :	Mab de calicata C-04' (Suelo CL)	Grupo:	GE-01
Cantera :	Material propio	Profundidad:	<u>1.00@1.50 m.</u>
		Realizado por :	Bach. Ing. Civil Carlos Falconi Oré
		Fecha:	23/06/2017

Densidad Seca Máxima	:	1.84	gr/cm ³	
Humedad Óptima	:	15.65	%	
C.B.R. 0.1" - 95 % D.S.M.	:	15.00	%	
C.B.R. 0.1" - 100 % D.S.M.	:	20.00	%	
Expansión	:	0.00	%	

Ing. Hermes Valdivia A.
Jefe del Lab. de Mec. de Suelos





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y

DESARROLLO SOSTENIBLE

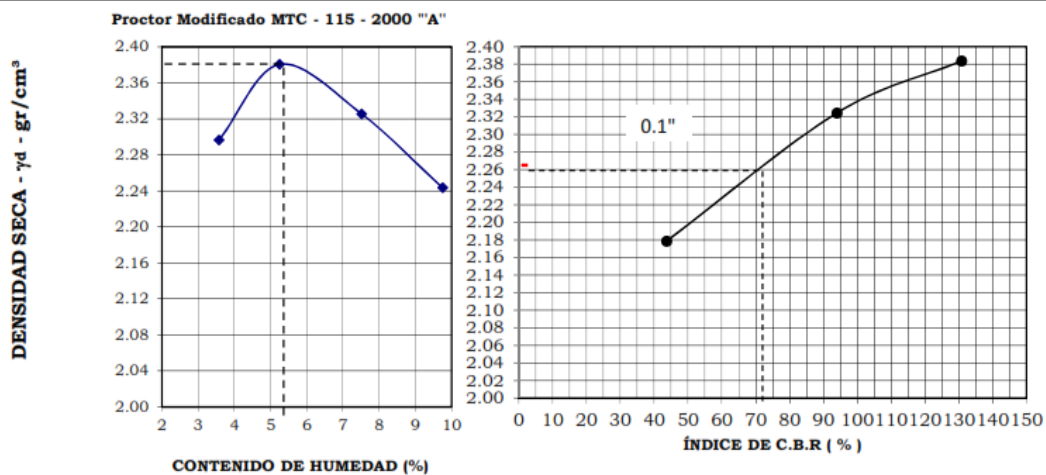
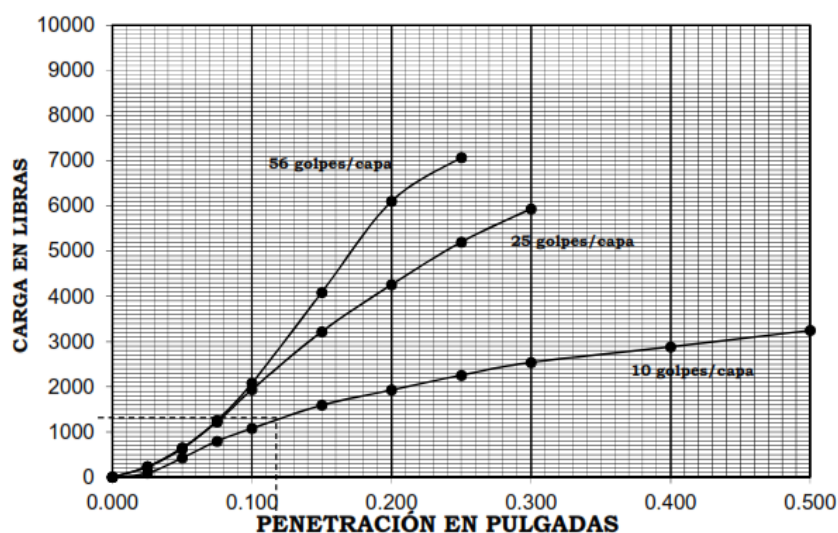
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE C.B.R. NTP 339.175:2002 (ASTM D - 1883)

Solicitante	: CARLOS FALCONI ORÉ	Expediente:	PROYECTO DE TESIS
Proyecto de Tesis	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.	Realizado por	: Bach. Ing. Civil Carlos Falconi Oré
Muestra	: Mab seleccionado (Suelo GM)		
Cantera	: Gloria	Grupo:	GE-02
		Fecha:	08/09/2017

Densidad Seca Máxima	:	2.38	gr/cm ³
Humedad Óptima	:	5.30	%
C.B.R. 0.1" - 95 % D.S.M.	:	70.00	%
C.B.R. 0.1" - 100 % D.S.M.	:	127.00	%
Expansión	:	0.00	%

Ing. Hermes Valdivia A.
Jefe del Lab. de Mec. de Suelos





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE C.B.R. NTP 339.175:2002 (ASTM D - 1883)

Solicitante : CARLOS FALCONI ORÉ		Expediente:																																								
Proyecto : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		PROYECTO DE TESIS																																								
Ubicación : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.		Realizado por : Bach. Ing. Civil Carlos Falconi Oré Fecha: 07/07/2017																																								
Muestra : Mab de calicata C-04' (Suelo CL c/. Aditivo)	Grupo: GE-03																																									
Cantera : Material propio	Profundidad : 1.0 @ 1.50 m.																																									
Densidad Seca Máxima : 1.84 gr/cm³		----- Ing. Hermes Valdivia A. Jefe del Lab. de Mec. de Suelos																																								
Humedad Óptima : 16.20 %																																										
C.B.R. 0.1" - 95 % D.S.M. : 17.00 %																																										
C.B.R. 0.1" - 100 % D.S.M. : 22.00 %																																										
Expansión : 0.00 %																																										
<table border="1"><caption>Data for Carga vs Penetración</caption><thead><tr><th>Penetración (Pulgadas)</th><th>10 golpes/capa (Libras)</th><th>25 golpes/capa (Libras)</th><th>56 golpes/capa (Libras)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.000</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0.050</td><td>100</td><td>150</td><td>200</td></tr><tr><td>0.100</td><td>200</td><td>300</td><td>400</td></tr><tr><td>0.150</td><td>300</td><td>450</td><td>600</td></tr><tr><td>0.200</td><td>400</td><td>600</td><td>800</td></tr><tr><td>0.250</td><td>450</td><td>750</td><td>1000</td></tr><tr><td>0.300</td><td>500</td><td>850</td><td>1200</td></tr><tr><td>0.400</td><td>600</td><td>1000</td><td>1500</td></tr><tr><td>0.500</td><td>700</td><td>1200</td><td>1800</td></tr></tbody></table>			Penetración (Pulgadas)	10 golpes/capa (Libras)	25 golpes/capa (Libras)	56 golpes/capa (Libras)	0.000	0	0	0	0.050	100	150	200	0.100	200	300	400	0.150	300	450	600	0.200	400	600	800	0.250	450	750	1000	0.300	500	850	1200	0.400	600	1000	1500	0.500	700	1200	1800
Penetración (Pulgadas)	10 golpes/capa (Libras)	25 golpes/capa (Libras)	56 golpes/capa (Libras)																																							
0.000	0	0	0																																							
0.050	100	150	200																																							
0.100	200	300	400																																							
0.150	300	450	600																																							
0.200	400	600	800																																							
0.250	450	750	1000																																							
0.300	500	850	1200																																							
0.400	600	1000	1500																																							
0.500	700	1200	1800																																							
Proctor Modificado MTC - 115 - 2000 "A" <table border="1"><caption>Data for Proctor Modificado</caption><thead><tr><th>Contenido de Humedad (%)</th><th>Densidad Seca (gr/cm³)</th></tr></thead><tbody><tr><td>14.5</td><td>1.79</td></tr><tr><td>16.2</td><td>1.84</td></tr><tr><td>18.0</td><td>1.80</td></tr><tr><td>20.5</td><td>1.73</td></tr></tbody></table> <table border="1"><caption>Data for C.B.R. Graph</caption><thead><tr><th>Densidad Seca (gr/cm³)</th><th>Índice de C.B.R. (%)</th></tr></thead><tbody><tr><td>1.63</td><td>10</td></tr><tr><td>1.77</td><td>15</td></tr><tr><td>1.89</td><td>25</td></tr></tbody></table>			Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (gr/cm³)	14.5	1.79	16.2	1.84	18.0	1.80	20.5	1.73	Densidad Seca (gr/cm³)	Índice de C.B.R. (%)	1.63	10	1.77	15	1.89	25																						
Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (gr/cm³)																																									
14.5	1.79																																									
16.2	1.84																																									
18.0	1.80																																									
20.5	1.73																																									
Densidad Seca (gr/cm³)	Índice de C.B.R. (%)																																									
1.63	10																																									
1.77	15																																									
1.89	25																																									



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

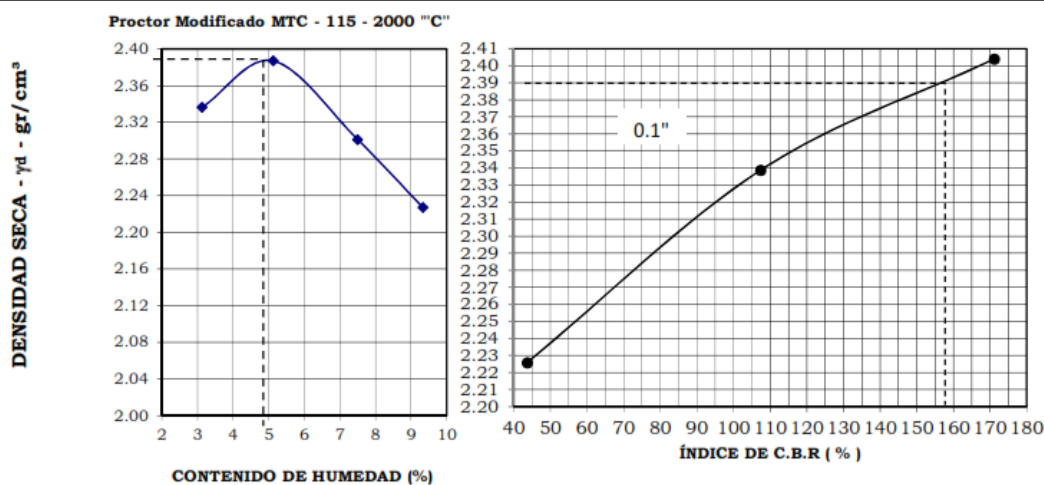
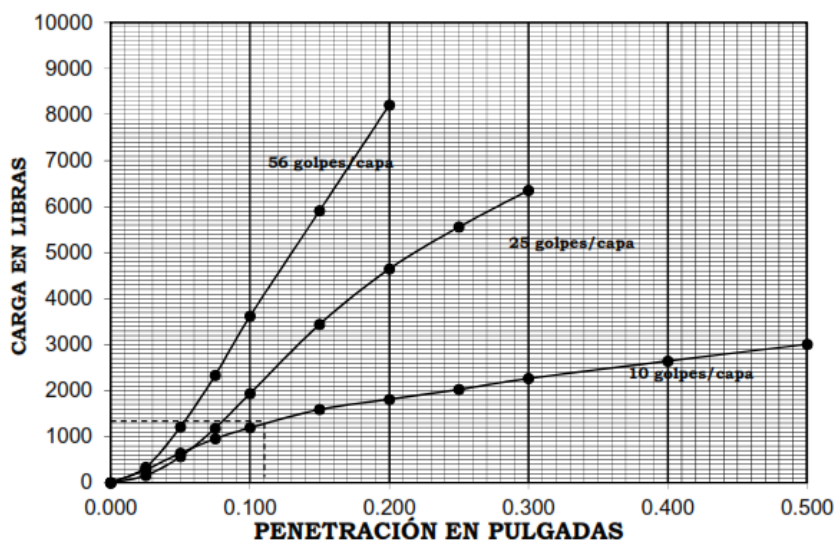
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y

DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE C.B.R. NTP 339.175:2002 (ASTM D - 1883)

Solicitante : CARLOS FALCONI ORÉ		Expediente: PROYECTO DE TESIS
Proyecto de Tesis : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación : Distrito de Ventanilla, Provincia del Callao, Departamento del Lima.		Realizado por : Bach. Ing. Civil Carlos Falconi Oré
Muestra : Mab seleccionado (Suelo GM c/. Aditivo)		
Cantera : Gloria	Grupo: GE-04	Fecha: 27/09/2017
Densidad Seca Máxima	: 2.39 gr/cm³	----- Ing. Hermes Valdivia A. Jefe del Lab. de Mec. de Suelos
Humedad Óptima	: 4.60 %	
C.B.R. 0.1" - 95 % D.S.M.	: 67.00 %	
C.B.R. 0.1" - 100 % D.S.M.	: 158.00 %	
Expansión	: 0.00 %	



7.5 Ensayos de compresión triaxial realizados



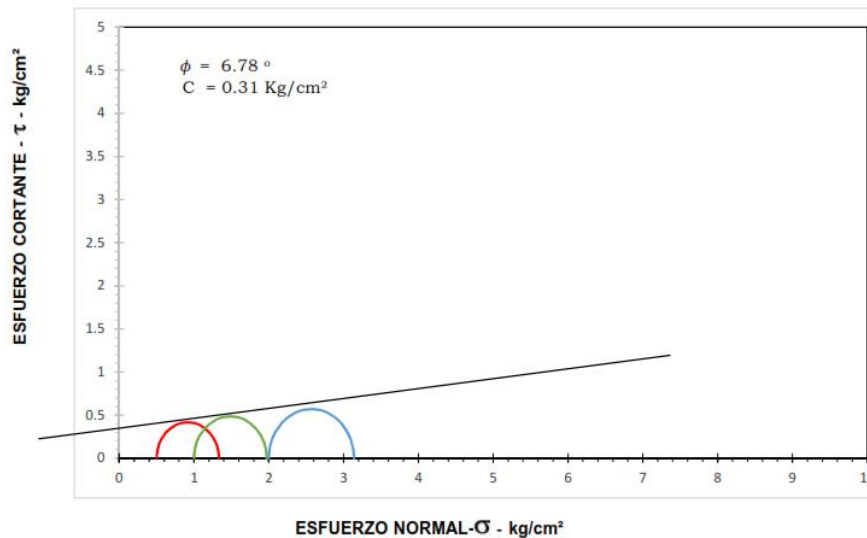
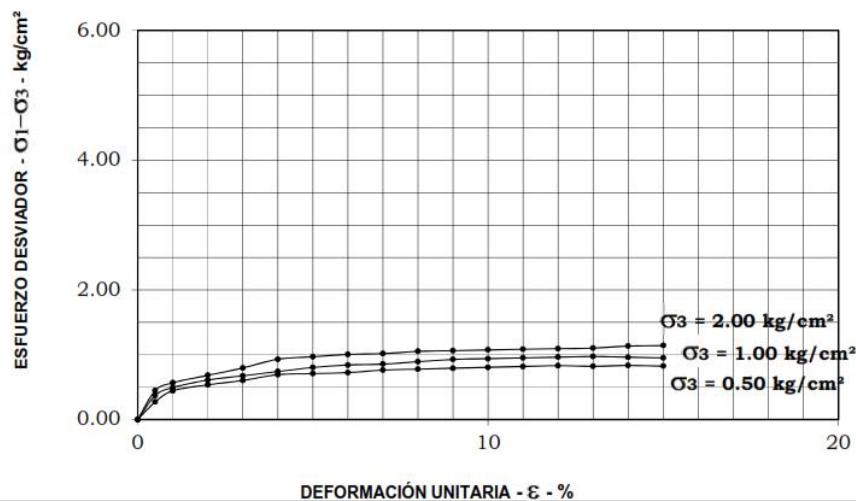
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	24/10/2018
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo de control (GC)	Material:	Natural
Calicata	: C - 04'	Replica N°	01
Muestra	: Remoldeada (Suelo CH)	Profundidad:	1.50 m @ 2.50
Angulo de fricción interna del suelo	: 6.78 °	Ing. Hermes Valdivia Aspilueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos	
Cohesión Aparente del suelo	: 0.31 kg/cm ²		
Densidad natural	: 1.75 gr/cm ³		
Humedad	: 26.94 %		



Observación: Muestra Remoldeada a densidad de campo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

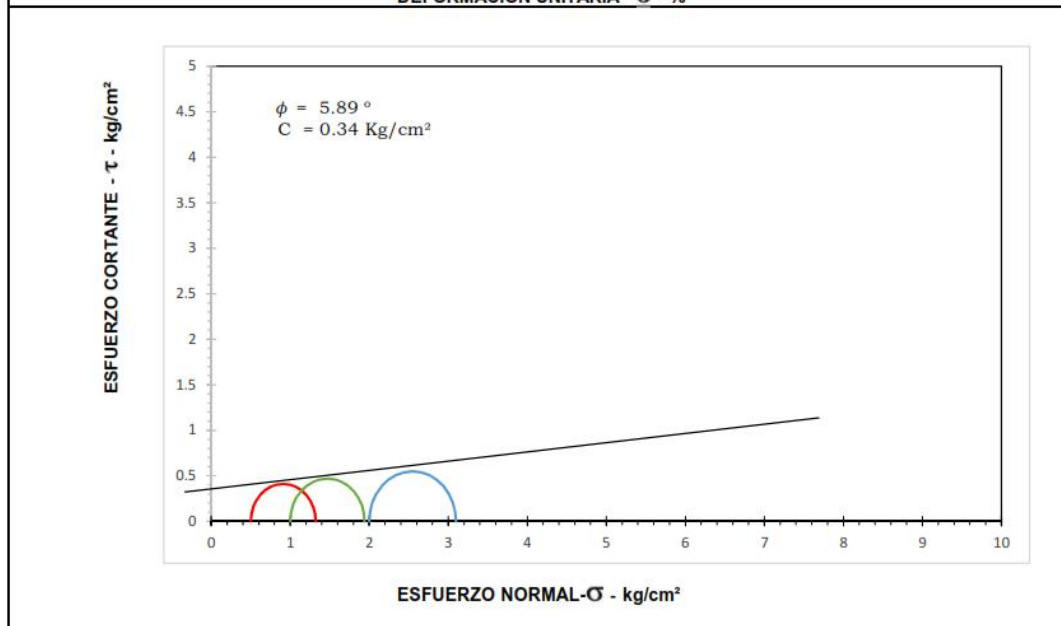
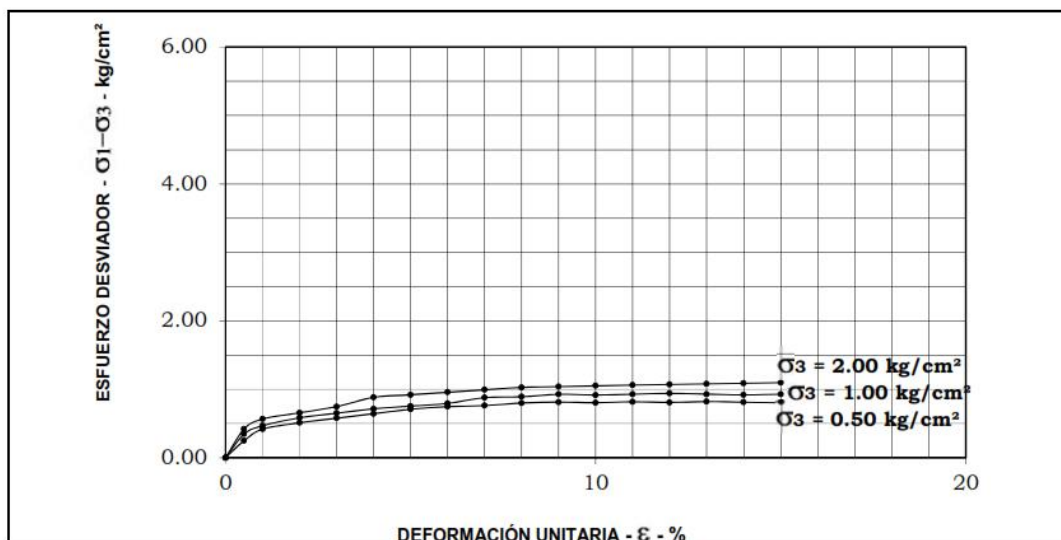
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	24/06/2022
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo de control (GC)	Material:	Natural
Calicata	: C - 04'	Replica N°:	02
Muestra	: Remoldeada (Suelo CH)	Profundidad:	1.50 m @ 2.50
		Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré

Angulo de fricción interna del suelo	:	5.89 °	
Cohesión Aparente del suelo	:	0.34 kg/cm ²	
Densidad natural	:	1.75 gr/cm ³	
Humedad	:	26.94 %	
			Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos



Observación: Muestra Remoldeada a densidad de campo



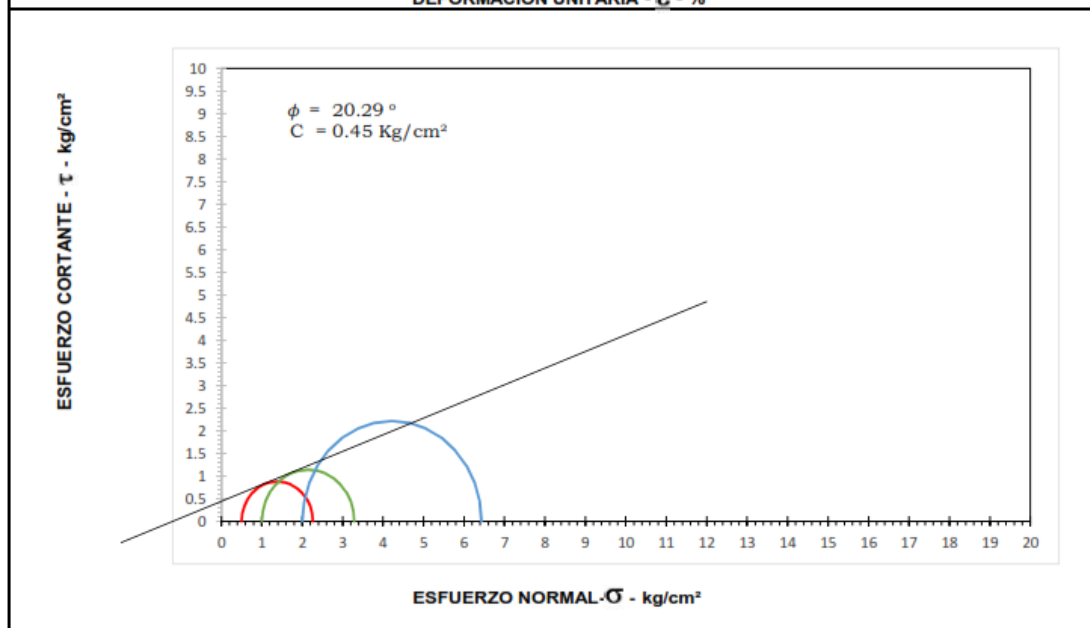
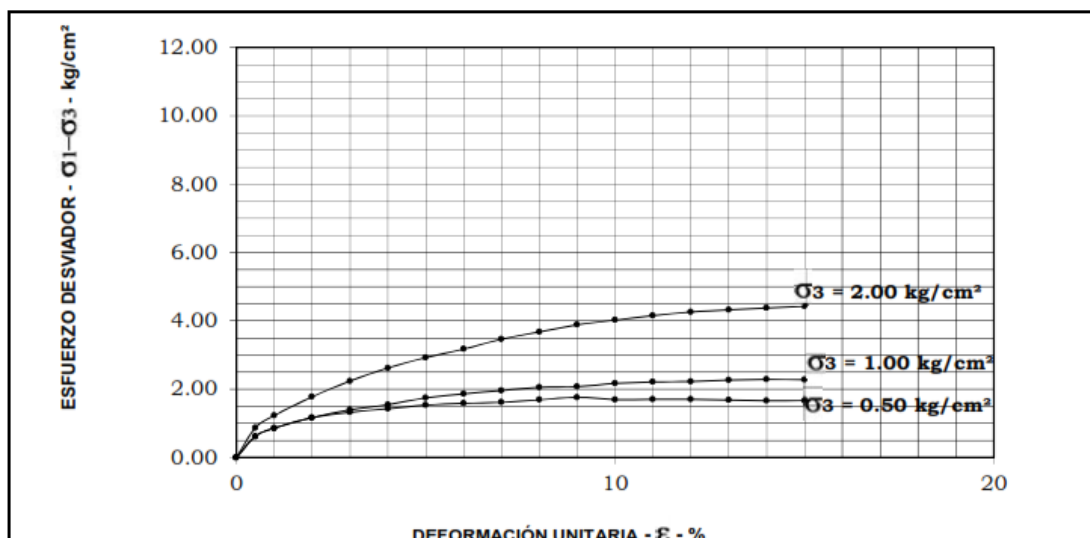
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	21/09/2018
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"	Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo de control (GC)	Material:	Natural
Calicata	: C - 04'	Réplica N°:	01
Muestra	: Remoldeada (Suelo CL)	Profundidad:	1.00 m @ 1.50 m

Angulo de fricción interna del suelo	:	20.29 °	Ing. Hermes Valdivia Asplicueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos
Cohesión Aparente del suelo	:	0.45 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	1.31 gr/cm ³	
Humedad	:	13.08 %	



Observación: Muestra Remoldeada a densidad de campo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

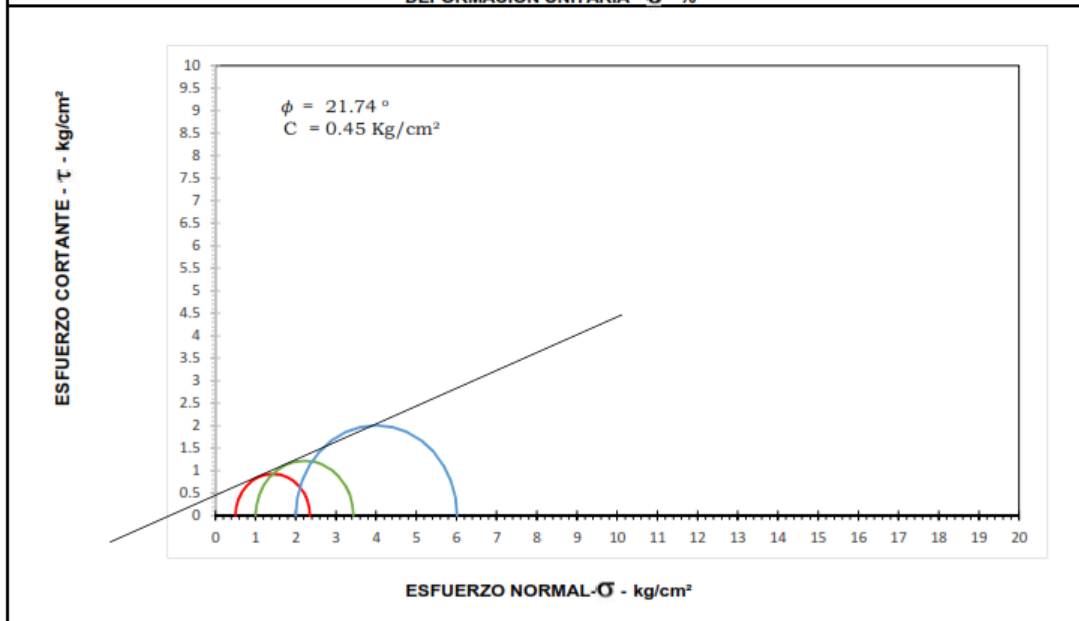
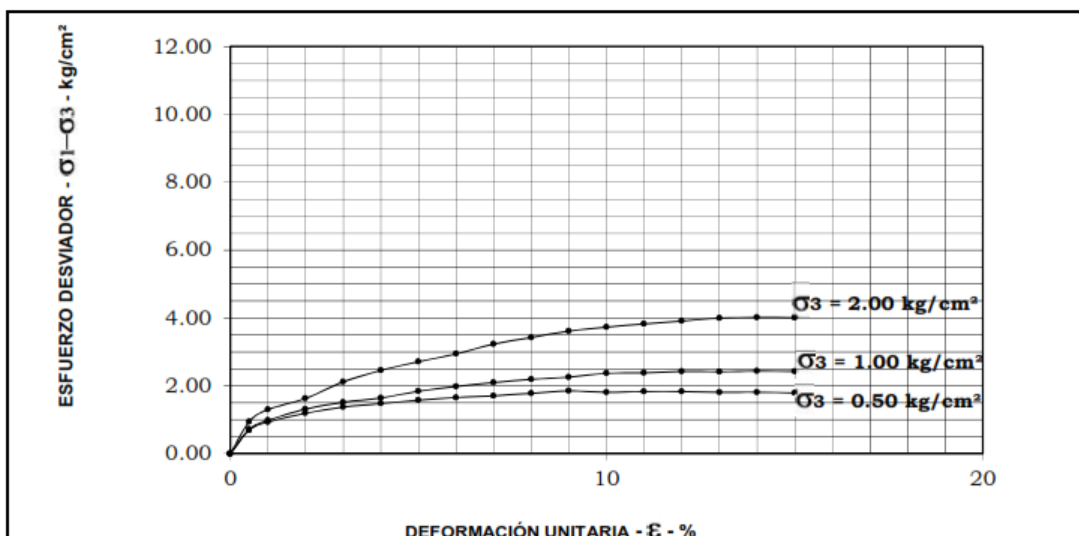
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	30/06/2022
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"	Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo de control (GC)	Material:	Natural
Calicata	: C - 04'	Réplica N°:	02
Muestra	: Remoldeada (Suelo CL)	Profundidad:	1.00 m @ 1.50 m

Angulo de fricción interna del suelo	:	21.74 °	
Cohesión Aparente del suelo	:	0.45 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	1.31 gr/cm ³	
Humedad	:	13.08 %	

Ing. Hermes Valdivia Asplicueta
Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos



Observación: Muestra Remoldeada a densidad de campo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

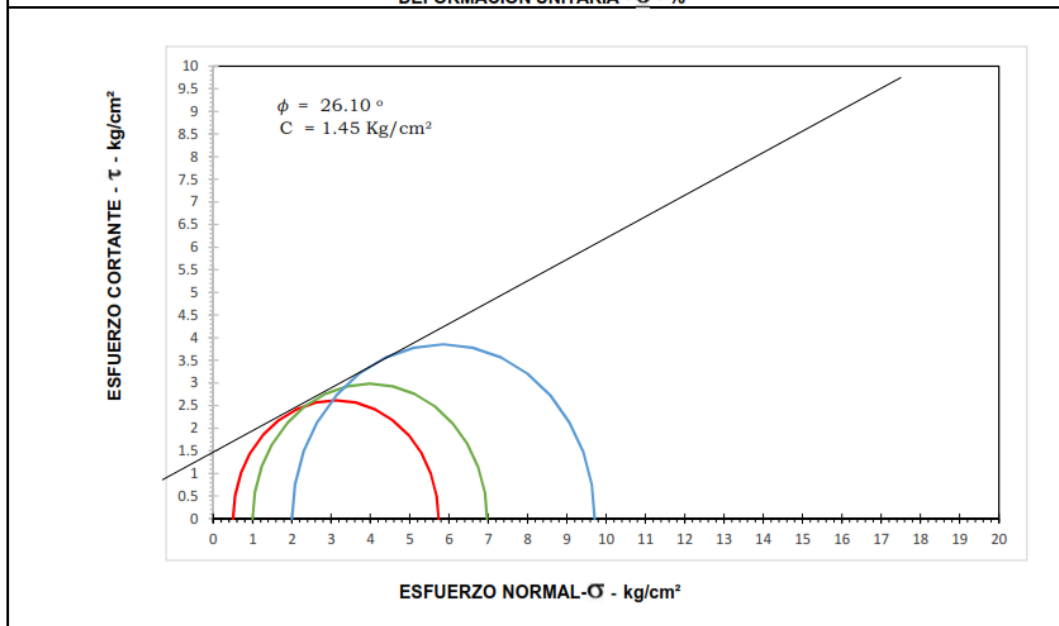
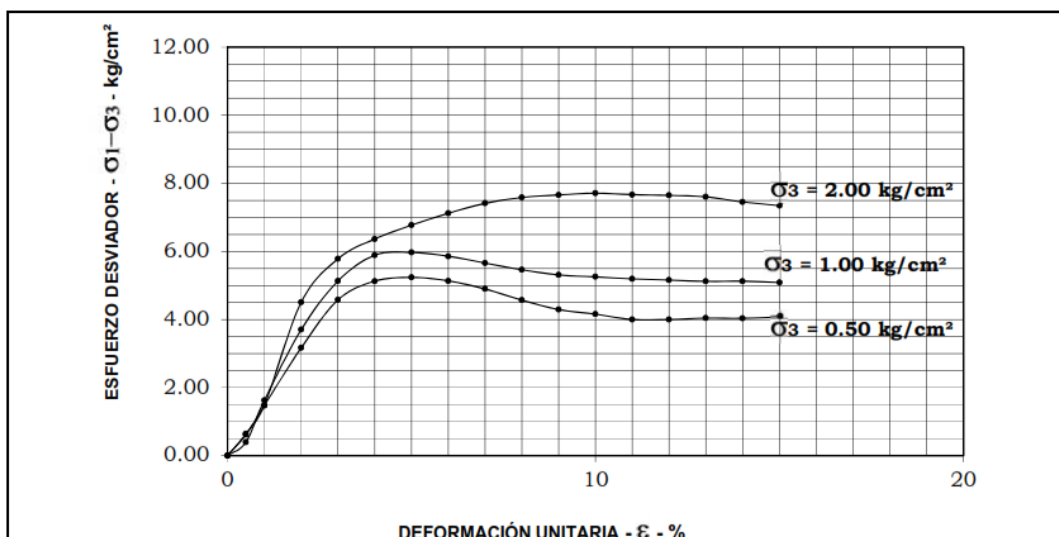
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	03/08/2018
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo experimental (GE-01)	Material:	Natural
Calicata	: C - 04'	Réplica N°:	01
Muestra	: Remoldeada (Suelo CL)	Profundidad:	1.50 m
		Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré

Angulo de fricción interna del suelo	:	26.10 °	Ing. Hermes Valdivia Asplicueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos
Cohesión Aparente del suelo	:	1.45 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	1.84 gr/cm ³	
Humedad	:	15.65 %	



Observación: Muestra Remoldeada a Máxima densidad de Próctor Modificado "A"



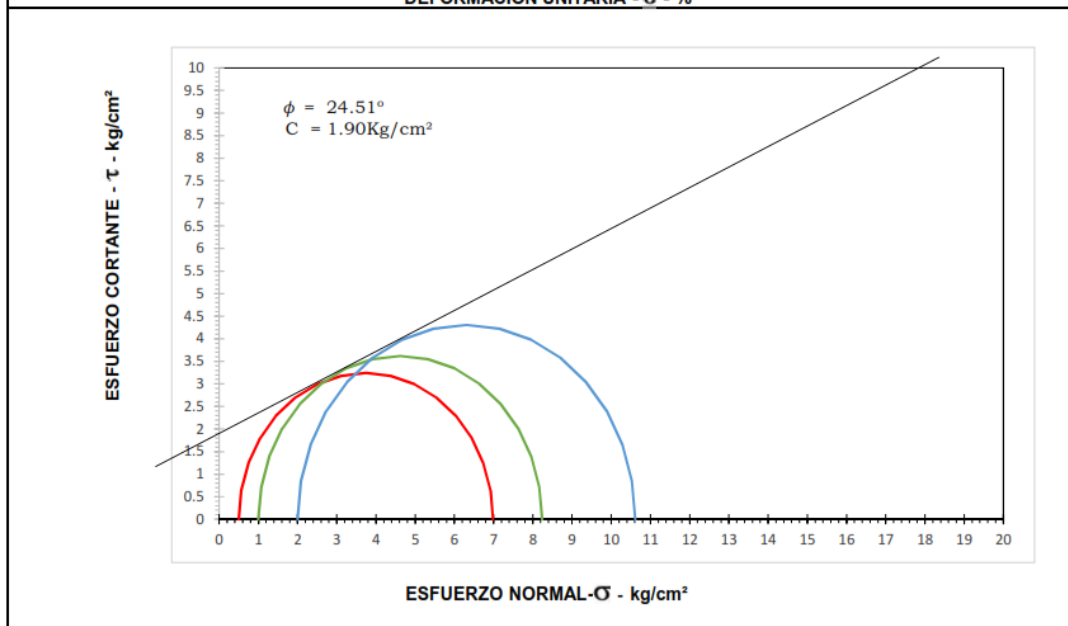
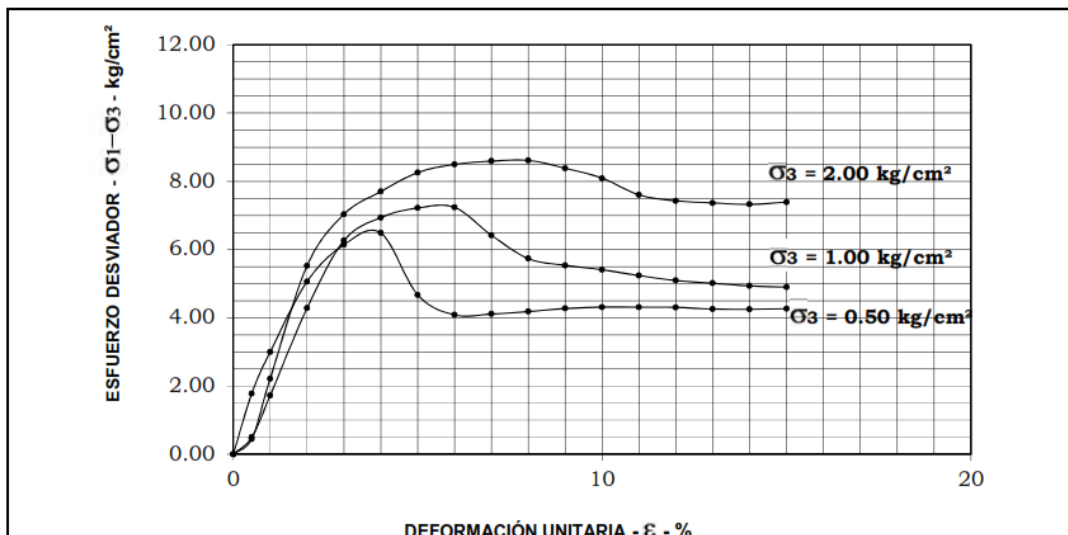
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	03/08/2018
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"	Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo experimental (GE-01)	Material:	Natural
Calicata	: C - 04'	Réplica N°:	02
Muestra	: Remoldeada (Suelo CL)	Profundidad:	1.50 m

Angulo de fricción interna del suelo	:	24.51 °	Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos
Cohesión Aparente del suelo	:	1.90 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	1.84 gr/cm ³	
Humedad (OCH)	:	15.65 %	



Observación: Muestra Remoldeada a Máxima densidad de Próctor Modificado "A"



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

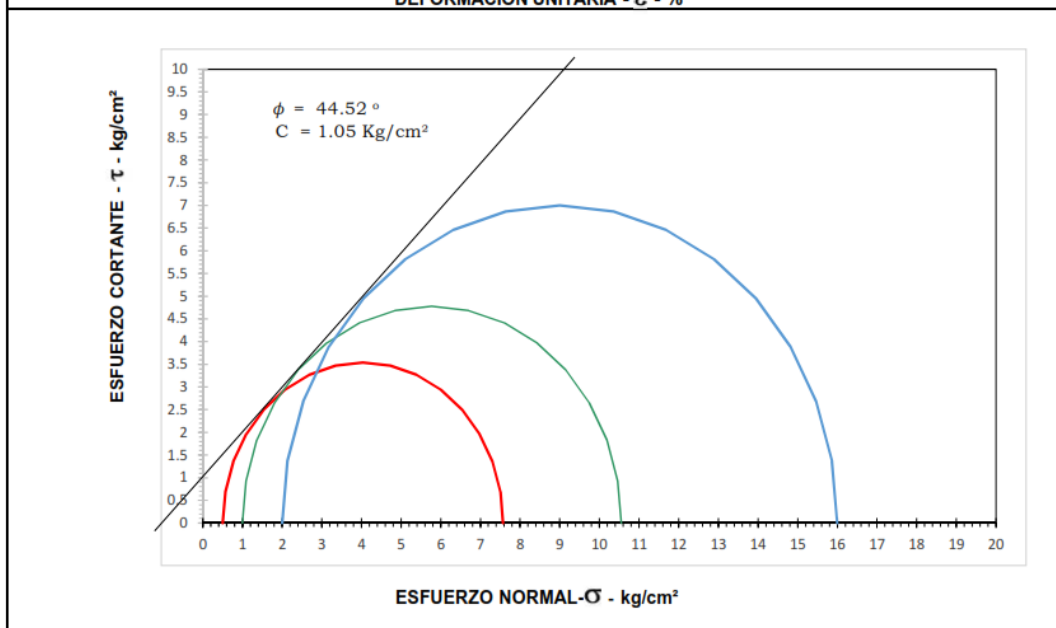
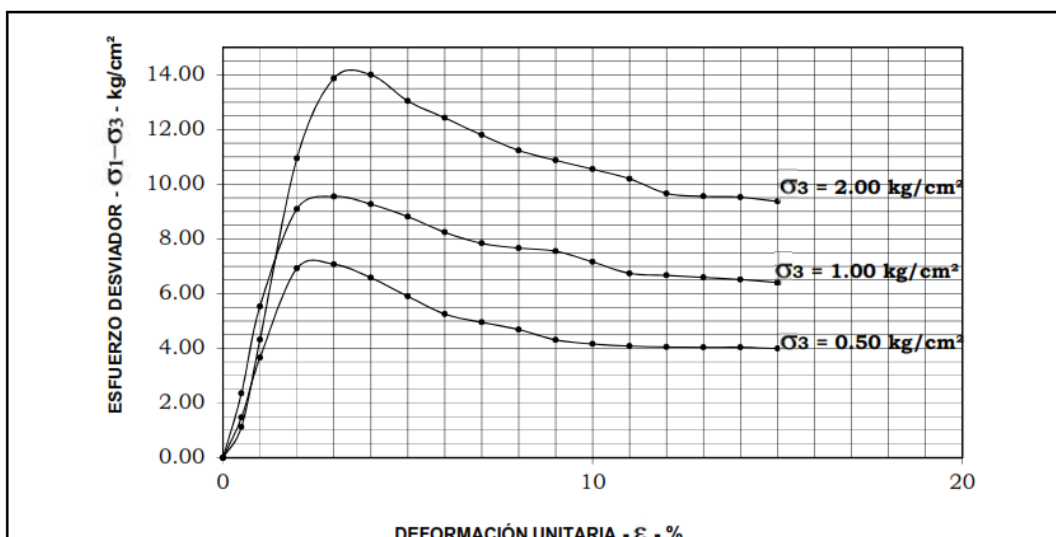
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	11/09/2017
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo experimental (GE-02)	Material:	Seleccionado
Muestra	: Remoldeado (Suelo GM)	Réplica N°:	01
Cantera	: Gloria	Profundidad:	-----
		Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré

Angulo de fricción interna del suelo	:	44.52 °	
Cohesión Aparente del suelo	:	1.05 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	2.38 gr/cm ³	
Humedad	:	5.30 %	
			Ing. Hermes Valdivia Aspigueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos



Observación: Muestra Remoldeada a Máxima densidad de próctor Modificada



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

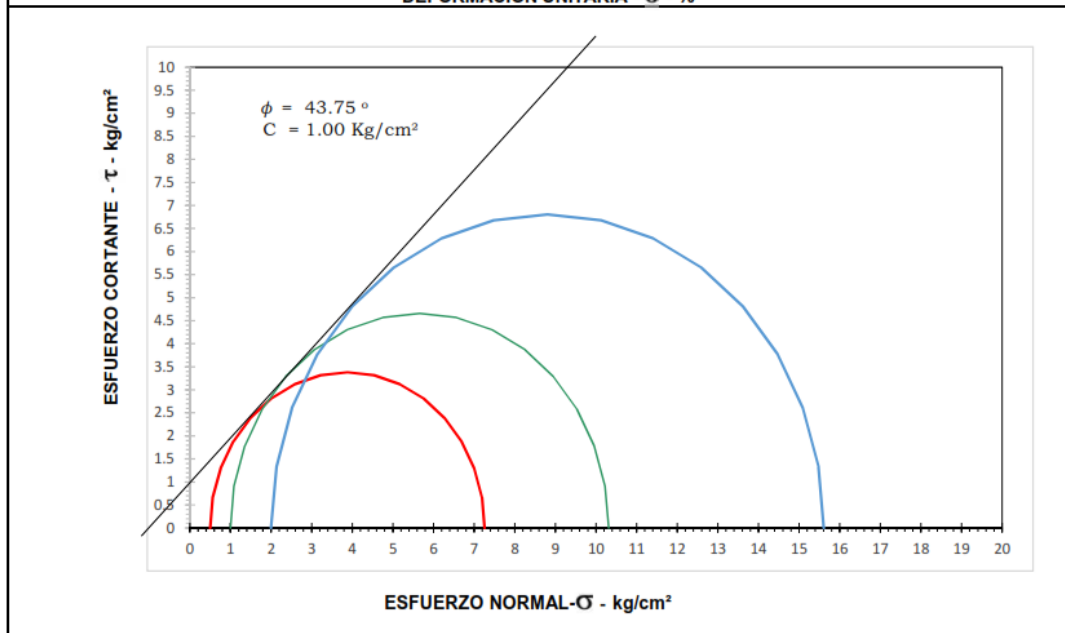
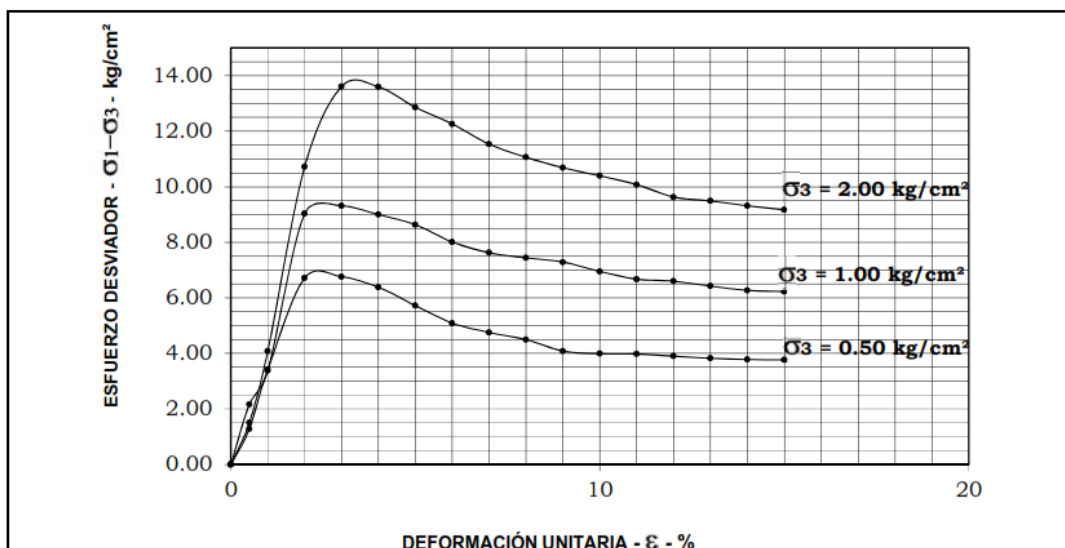
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	12/09/2018
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo experimental (GE-02)	Material:	Seleccionado
Muestra	: Remoldeada (Suelo GM)	Replica N°:	02
Cantera	: Gloria	Profundidad:	-----
		Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré

Angulo de fricción interna del suelo	:	43.75 °	Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos
Cohesión Aparente del suelo	:	1.00 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	2.38 gr/cm ³	
Humedad	:	5.30 %	



Observación: Muestra Remoldeada a Máxima densidad de próctor Modificada



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

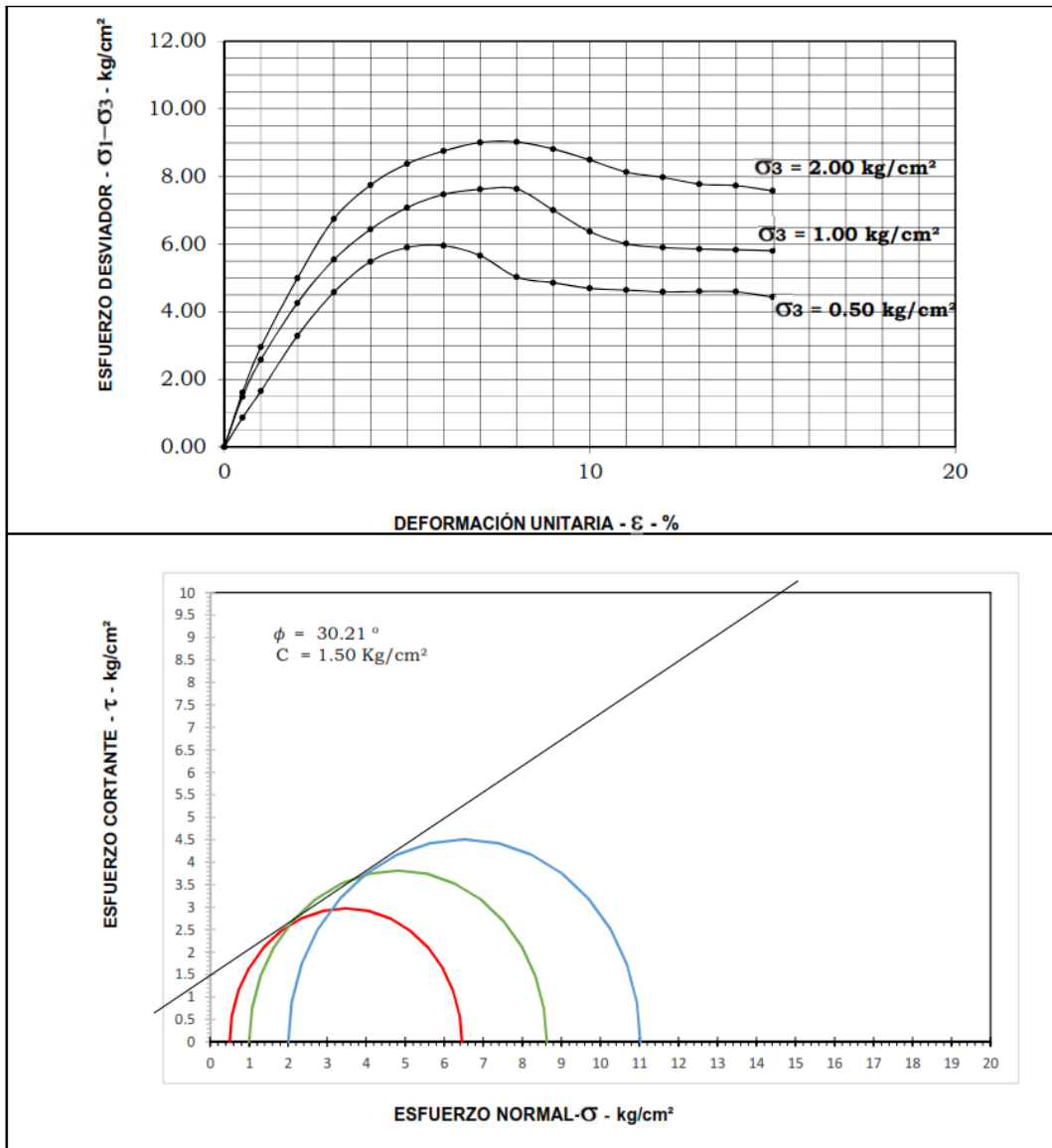
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	17/10/2018
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo experimental (GE-03)	Material:	Natural
Calicata	: C - 04'	Replica N°:	01
Muestra	: Remoldeado (Suelo CL + Aditivo)	Profundidad:	1.50 @ 2.50 m

Angulo de fricción interna del suelo	:	30.21 °	Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos
Cohesión Aparente del suelo	:	1.50 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	1.84 gr/cm ³	
Humedad	:	16.20 %	



Observación: Muestra Remoldeada a Máxima densidad de Próctor Modificado "A"



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

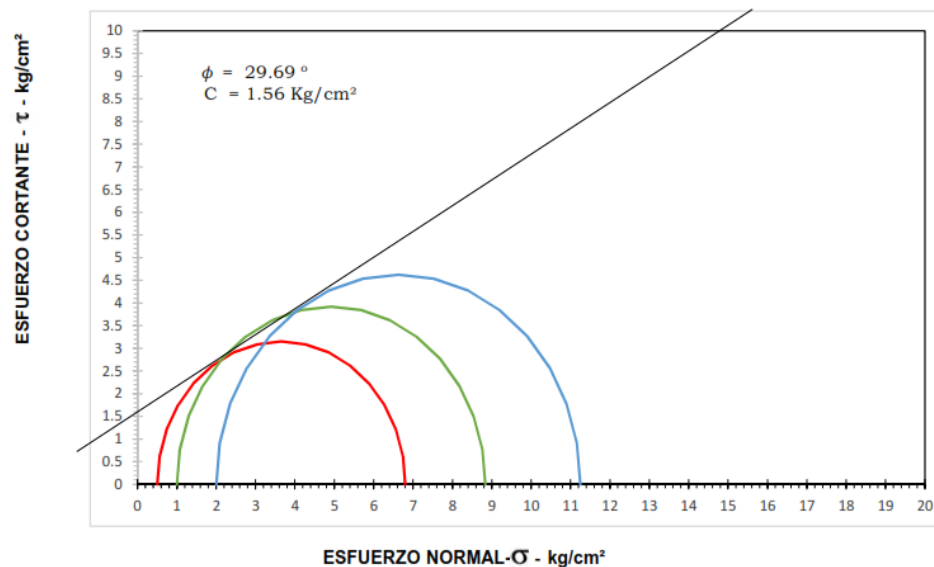
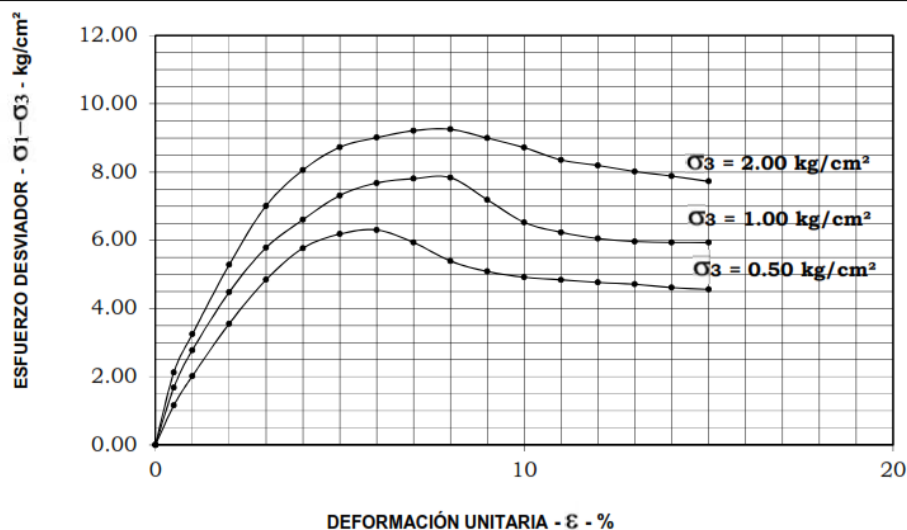
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	17/10/2018
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"	Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo experimental (GE-03)	Material:	Natural
Calicata	: C - 04'	Réplica N°:	02
Muestra	: Remoldeado (Suelo CL + Aditivo)	Profundidad:	1.50 @ 2.50 m

Angulo de fricción interna del suelo	:	29.69 °	
Cohesión Aparente del suelo	:	1.56 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	1.84 gr/cm ³	
Humedad	:	16.20 %	

Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta
Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos



Observación: Muestra Remoldeada a Máxima densidad de Próctor Modificado "A"



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

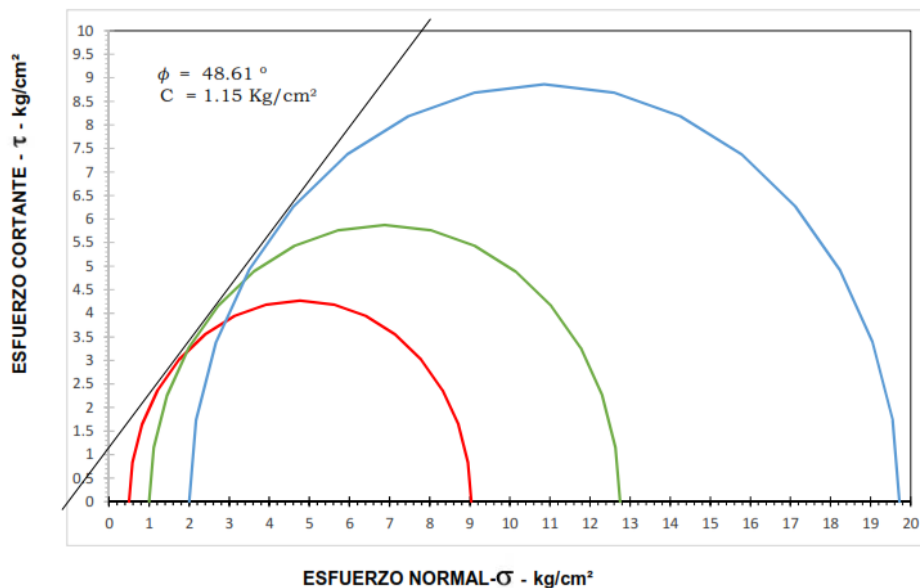
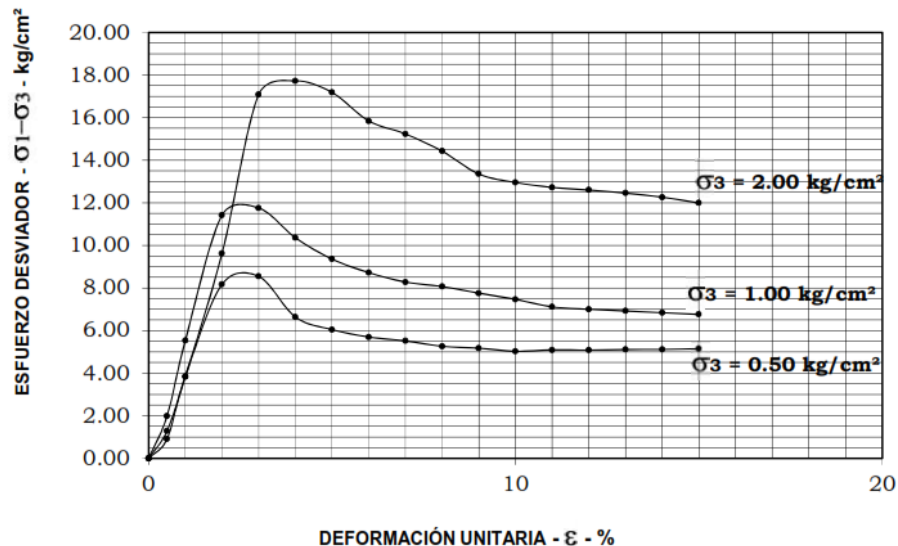
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	12/07/2022
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo experimental (GE-04)	Material:	Seleccionado
Muestra	: Remoldeado (Suelo GM+aditivo Terrazyme)	Réplica N°:	01
Cantera	: Gloria	Profundidad:	-----
		Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré

Angulo de fricción interna del suelo	:	48.61 °	Ing. Hermes Valdivia Aspícueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos
Cohesión Aparente del suelo	:	1.15 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	2.39 gr/cm ³	
Humedad	:	4.60 %	



Observación: Muestra Remoldeada a Máxima densidad de próctor Modificado



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

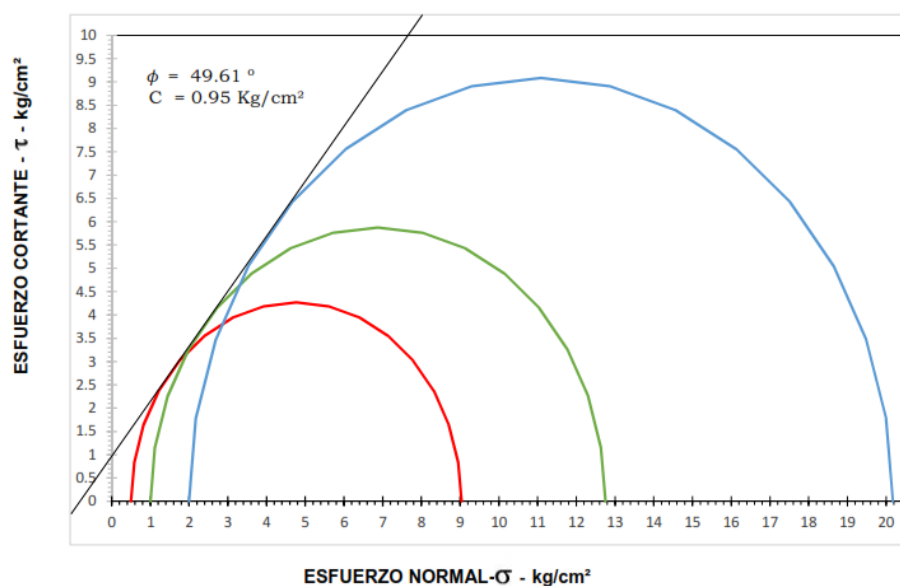
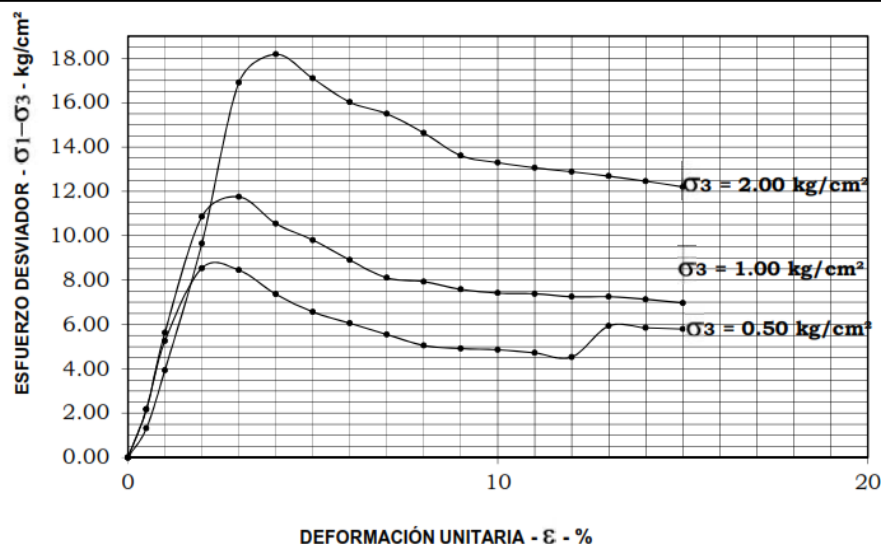
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL NO CONSOLIDADO - NO DRENADO NTP 339.164 (ASTM D2850)

Solicitante	: Carlos Falconi Oré	Fecha:	19/07/2022
Proyecto de Tesis	: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"		
Ubicación	: Distrito de Ventanilla, Provincia Del Callao, Departamento de Lima		
Grupo	: Grupo experimental (GE-04)	Material:	Seleccionado
Muestra	: Remoldeada (Suelo GM+ aditivo Terrazyme)	Réplica N°:	02
Cantera	: Gloria	Profundidad:	-----
		Responsable:	Ing. Bachiller Carlos Falconi Oré

Angulo de fricción interna del suelo	:	49.61 °	----- Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta Jefe de Laboratorio de Mecánica de Suelos
Cohesión Aparente del suelo	:	0.95 kg/cm ²	
Densidad Seca	:	2.39 gr/cm ³	
Humedad	:	4.60 %	



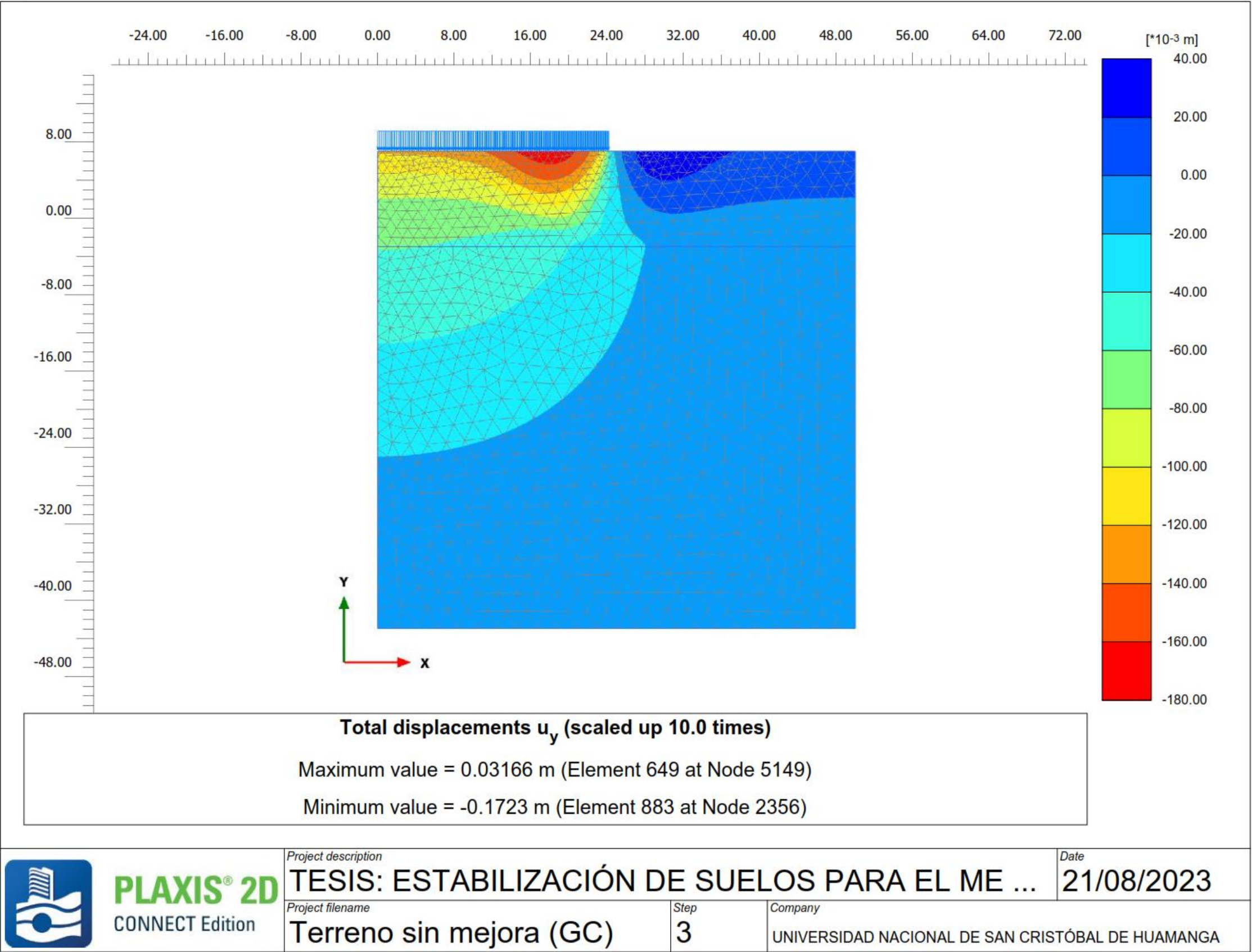
Observación: Muestra Remoldeada a Máxima densidad de próctor Modificado

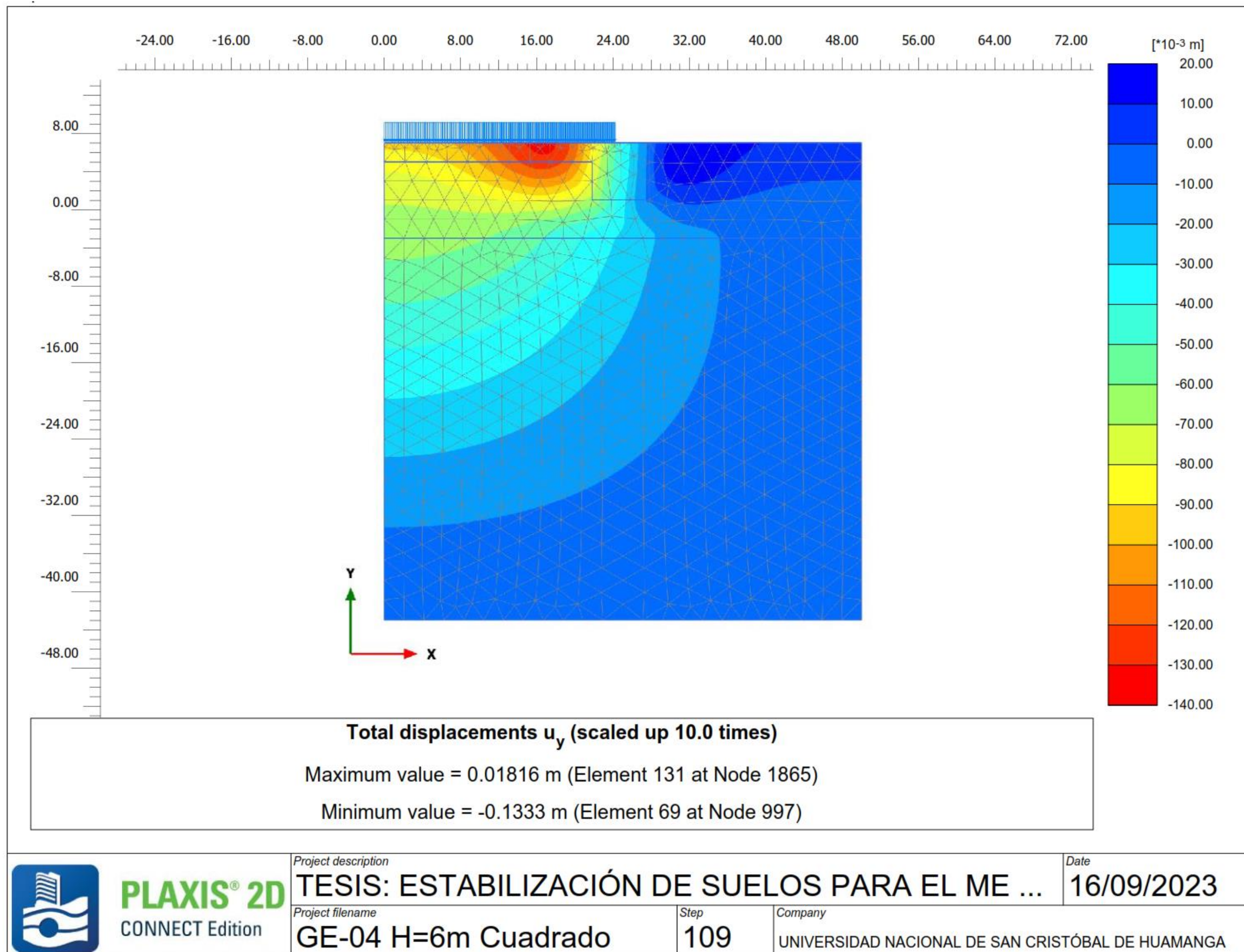
7.6 Especificaciones técnicas de aditivo Terrazyme

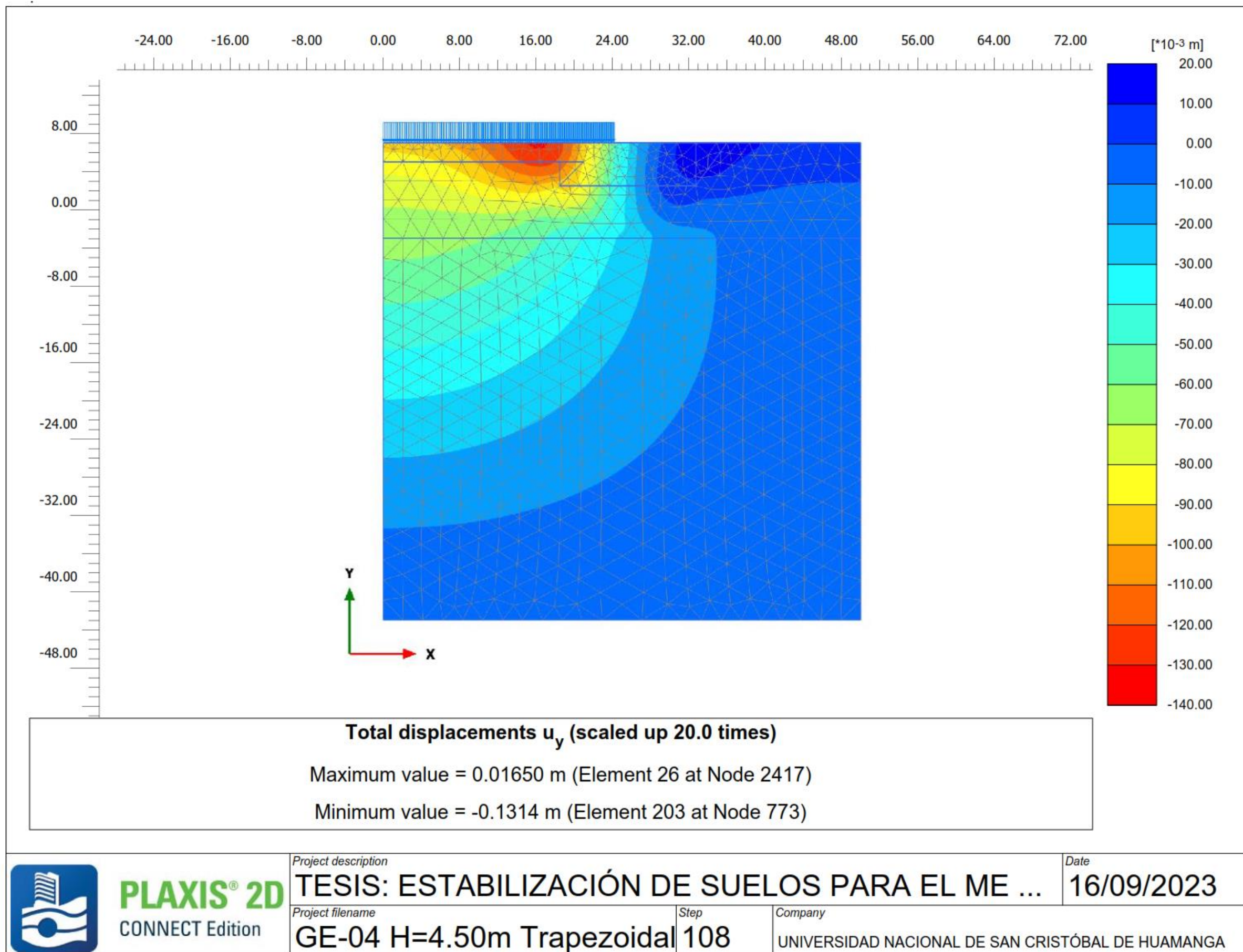
Aspecto	Terrazyme
Tecnología	- Sistema enzimático.
Efecto en la estructura mineral de la arcilla	- Reduce la plasticidad y permeabilidad. - Incrementa la densidad y CBR.
Características y Comportamiento	- Reacciones e intercambio iónico, electroquímico con las partículas de la arcilla; reducción de tensión superficial; elimina el agua contenida – hidrofóbico; y degradación enzimática del material orgánico en el suelo.
Naturaleza	- Tecnología de fermentación de vegetales. - Líquido.
Rango	- Amplio rango de suelos naturales incluyendo materiales con alto contenido arcilloso cohesivo.
Aplicación	- Los requerimientos de aplicación son mínimos. Es de fácil aplicación y de construcción económica. - Aplicación manual basada en una buena mezcla de suelo, suficiente dilución en agua del producto y una adecuada compactación. Moderado PI; especificado (<20). El suelo puede contener material orgánico.
Rendimiento	- Un bidón de 20 L rinde para 660 m ³ , con un largo de 1100 m, ancho de 4 m, y espesor de 15 cm, sin considerar esponjamiento. - Rinde 1 L para 220 m ² o 1 L sirve para 33 m ³ .
Vencimiento	- 36 meses, contados desde la fecha de fabricación.
Medio Ambiente	- Ecológico, “No” tóxico y biodegradable.
Propiedades a 25° C	- PH = 4 – 9; Gravedad específica = 1.0 – 1.10; Color = Marrón claro; Viscosidad, CPS = 20; Olor = Inodoro.
Test de laboratorio y evaluación	- Análisis de pre-construcción: granulometría del suelo, límite líquido e índice de plasticidad, PH, humedad natural y ensayo Proctor. - DCP/CBR y medidas de densidad en carreteras tratadas, para establecer el incremento de compactación con respecto al tiempo. Las condiciones en campo y el resultado se simulan en el laboratorio.

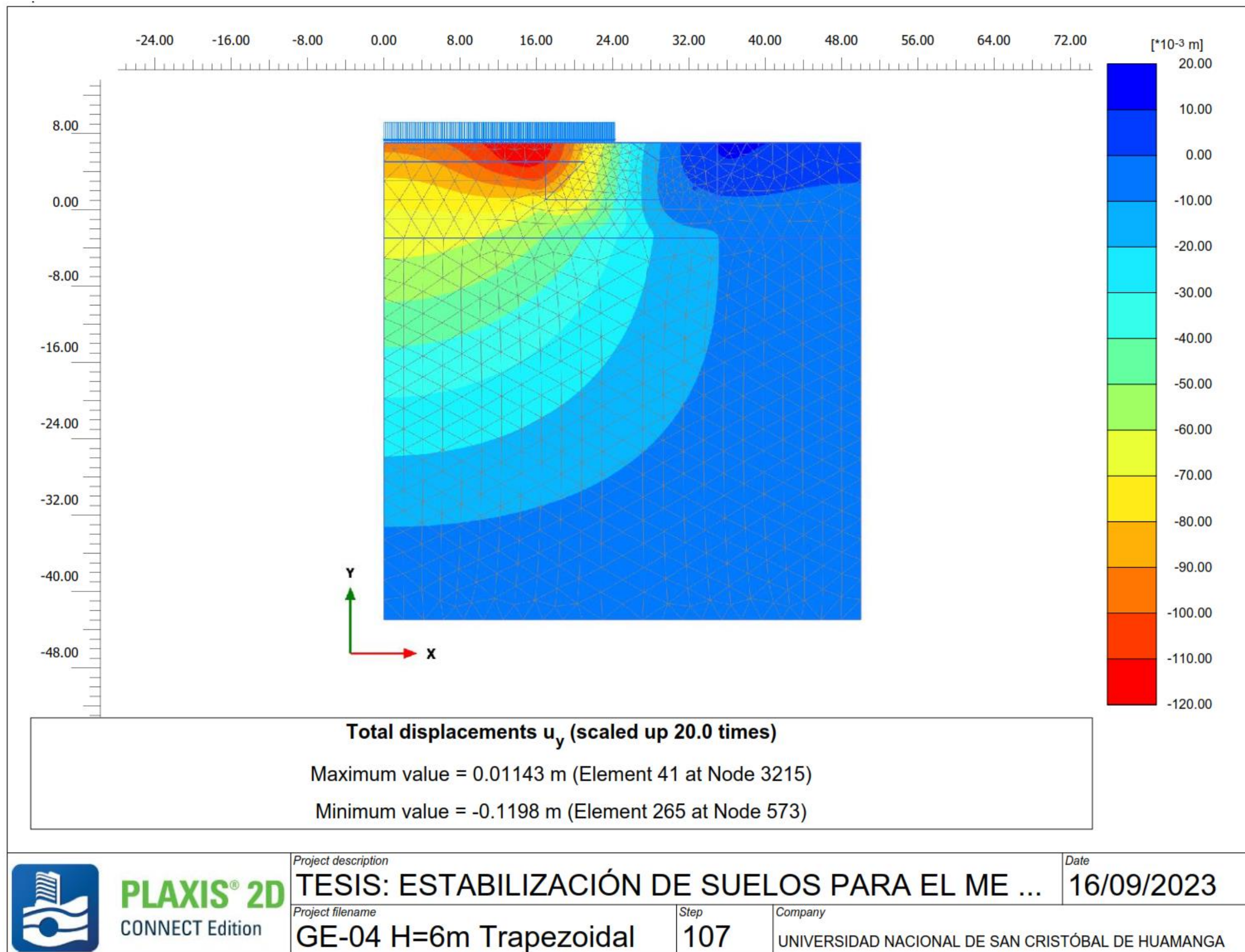
Fuente: (Stasoil S.A.C., 2003)

7.7 Asientos totales de modelos representativos de grupos de investigación







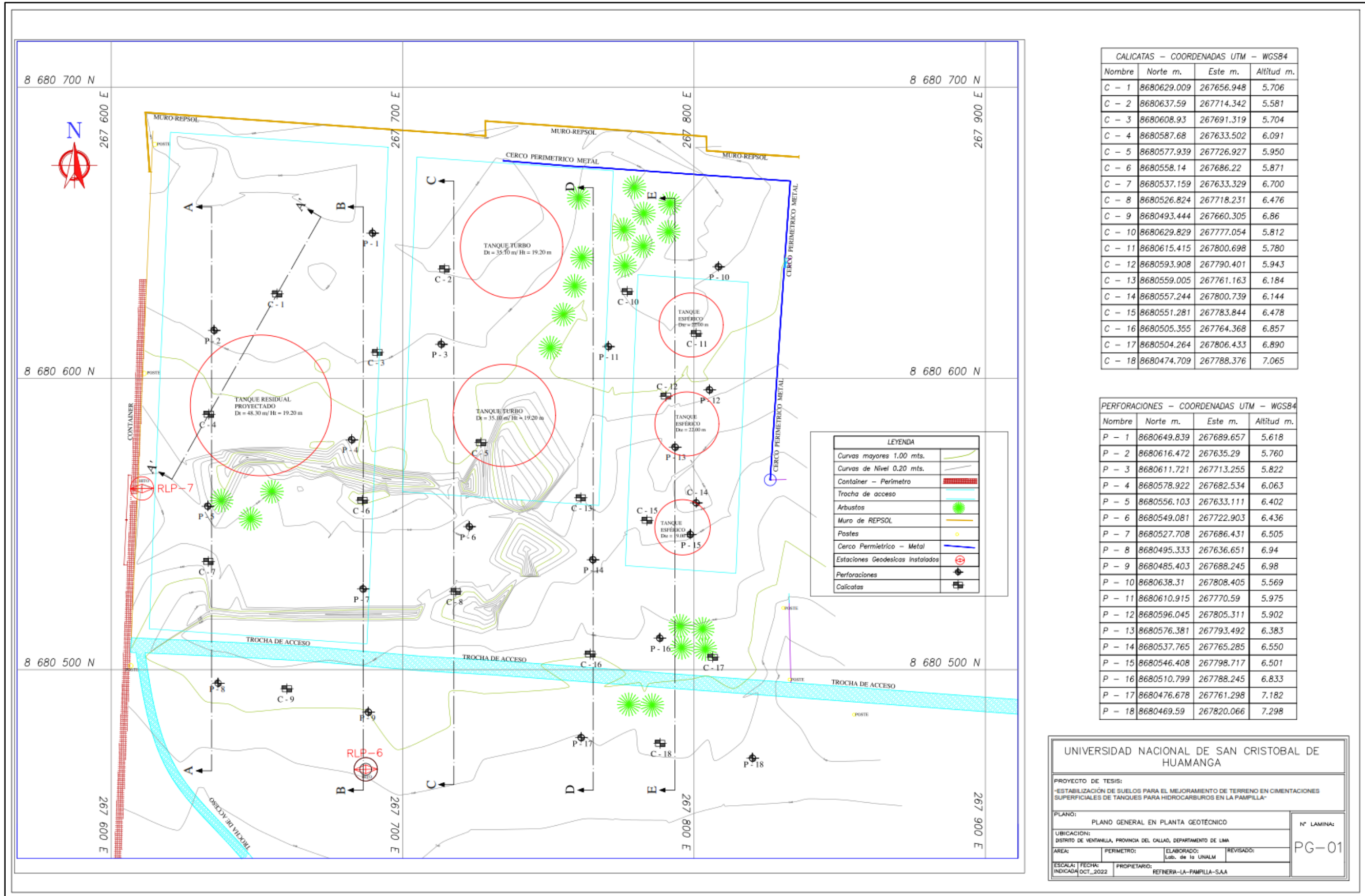


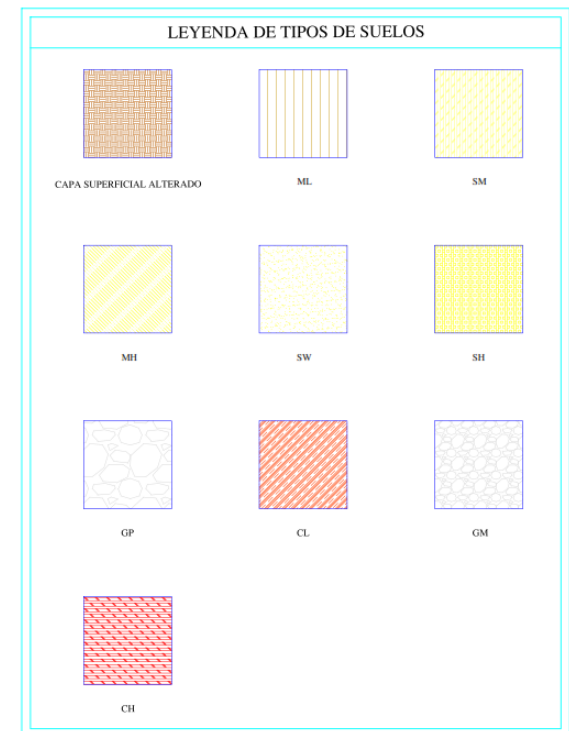
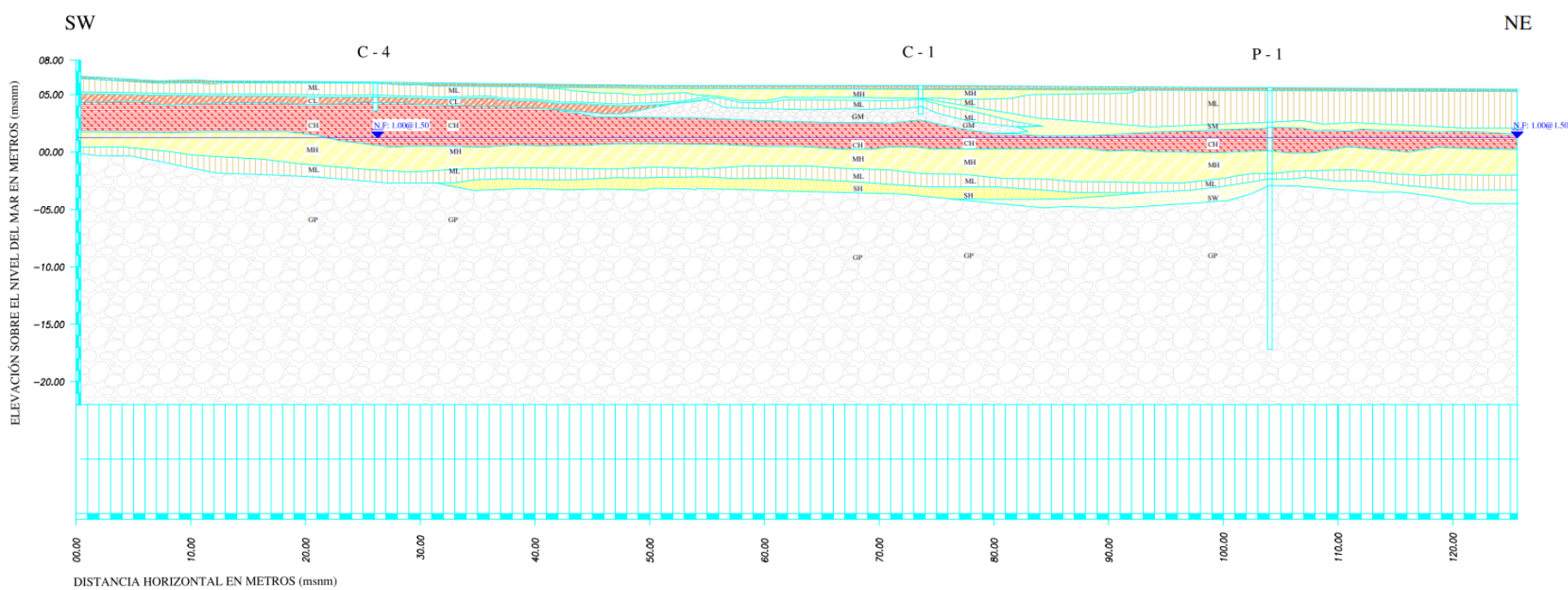
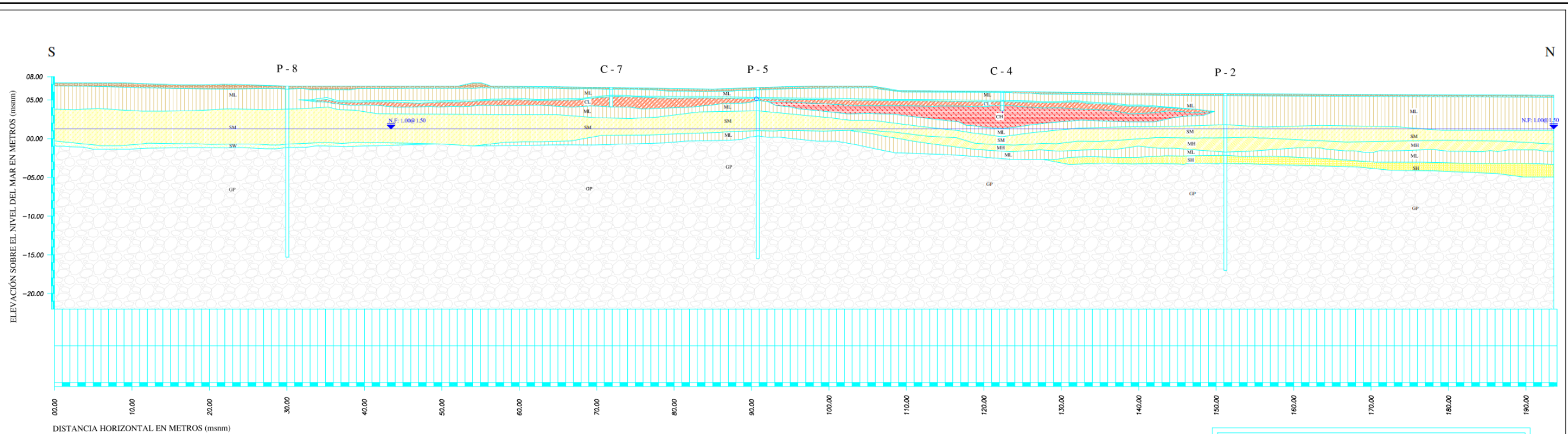
7.8 Matriz de Consistencia

Título: “Estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla”.

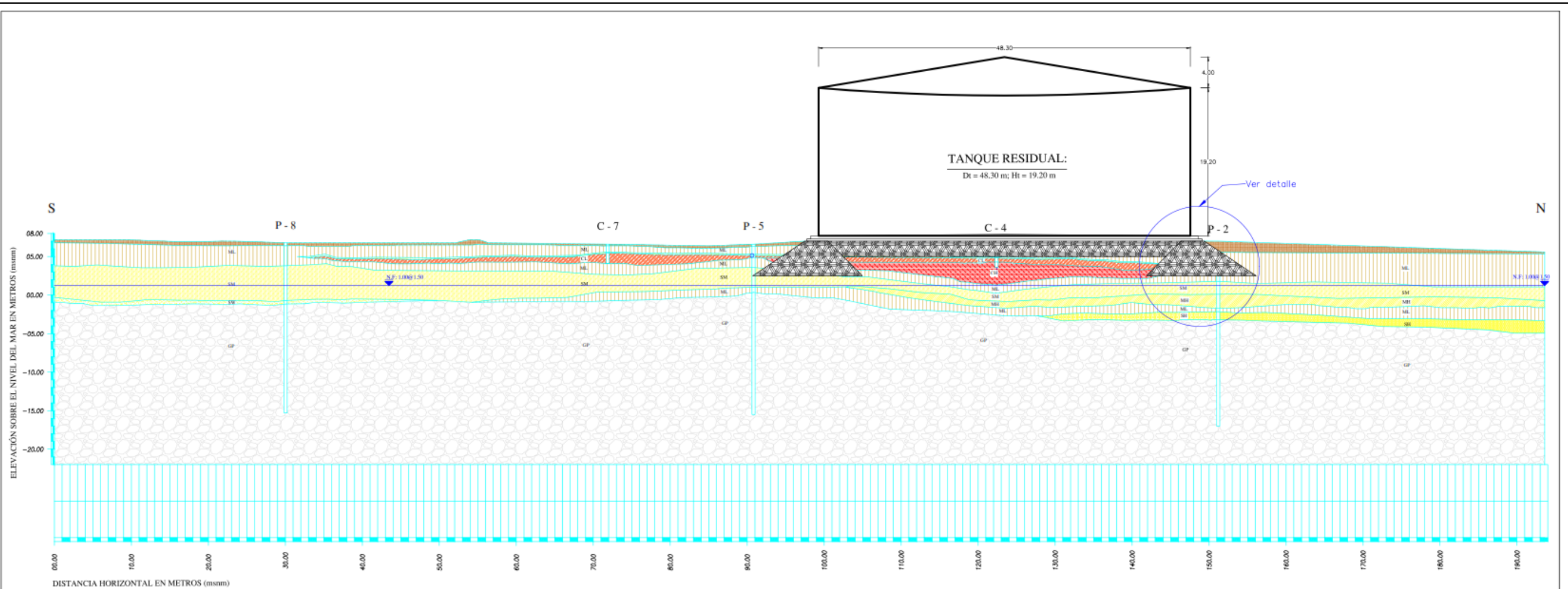
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	DISEÑO y METODOLOGÍA, POBLACIÓN Y MUESTRA	TÉCNICAS DE RECOLECTA, PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE DATOS	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
Problema general ¿Cuáles son los efectos que genera el uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima?	Objetivo general Determinar y analizar los efectos del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en la resistencia al corte para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima.	Hipótesis general El uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos generan efectos incrementales significativos de resistencia al corte en el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima.	VARIABLES: Para demostrar y comprobar la hipótesis anteriormente formulada, la operacionalizamos, determinando las variables e indicadores que a continuación se mencionan: Variable X = Independiente: X1 = Métodos de estabilización Indicadores: Óptimo contenido de humedad Densidad seca máxima. Índice CBR X2 = Tipo de suelos Indicadores Granulometría Plasticidad Clasificación Peso específico Variable Y = Dependiente: Mejoramiento de terreno Indicadores: Cohesión Ángulo de fricción Interna Capacidad de Carga	Método: La investigación es experimental dentro de la disciplina de ingeniería de cimentaciones. Y se inicia con la obtención de los datos de campo, laboratorio y procesamiento en gabinete. Tipo de investigación: Enfoque Cuantitativo Diseño de investigación: a. Según el Propósito: Es Descriptiva. b. Según el medio utilizado: Es Experimental c. Según el nivel de la investigación: Es Descriptiva, Explicativa y Experimental. d. Según el campo del conocimiento: Es Científica. e. Según el tipo de razonamiento: Es racional. f. Según el método empleado: Es Analítico y Deductivo g. Según al tiempo de la investigación: Es Transversal y vertical Población Suelos de fundación localizados debajo de la estructura proyectada en un área aproximada de 12,783.22 m2 y perímetro de 491.19 metros. Muestra Suelos desfavorables del tipo CL y suelos del tipo GM de material seleccionado de préstamo obtenidos por el método de cuarteo en la cantidad requerida para los ensayos del objeto de la investigación. Tipo de muestreo Teniendo como referencia la clasificación de los tipos de muestreo de Hernández, el tipo de muestreo es no probabilístico.	1. Técnicas de recolección de información a. Técnicas de investigación documental y bibliográfica. - Análisis de contenido. - Fichaje. b. Técnicas de campo - Observación. - Protocolo de recolección, reducción, conservación y transporte y manejo de muestras y ensayo de campo del suelo según N.T.P. y ASTM. c. Técnicas de laboratorio - Observación. - Protocolo de ensayos de laboratorio de ensayo estándar, ensayo de compactación, ensayos de calidad de agregados, clasificación de suelos AASHTO Y SUCS y ensayos especiales según N.T.P. y ASTM. 2. Procesamiento de datos Los datos se procesaron en hojas de cálculo en programas de cómputo, y utilizando la estadística descriptiva por medio de programas estadísticos se expresarán en tablas, histogramas de frecuencias y gráficos de líneas que representarán objetivamente los resultados obtenidos. 3. Presentación de datos Los datos se presentarán utilizando tablas, histogramas de frecuencias en forma de barras y gráficos de líneas interpretados estadísticamente que permitirán visualizar los resultados de manera didáctica.	1. Instrumentos de investigación documental y bibliográfica: a. Fichas de documentación e investigación: - Fichas textuales. - Fichas de resumen. - Fichas de comentario. b. Fichas de registro o localización: - Fichas bibliográficas. - Fichas hemerográficas. - Fichas de sitios WEB (internet). 2. Instrumentos de recolección de información de trabajo de campo: a. Libreta de campo. b. Instrumentos de campo. 3. Instrumentos de recolección de información de laboratorio: a. Guías de laboratorio Guía de laboratorio para anotar los datos del ensayo estándar, ensayo de compactación, ensayos de calidad de agregados, clasificación de suelos (AASHTO y SUCS) y ensayos especiales según N.T.P. y ASTM. b. Instrumentos de laboratorio: Instrumentos de Laboratorio de Mecánica de Suelos del Departamento de Ordenamiento Territorial y Construcción de la Universidad Nacional Agraria La Molina-UNALM
Problemas específicos a) ¿De qué manera influye el uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en los parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima bajo esfuerzos de compresión triaxial UU? b) ¿En qué porcentajes se incrementa la capacidad portante del suelo crítico con el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima a través del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos? c) ¿Hasta qué porcentajes de índice CBR se logra alcanzar con el uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima?	Objetivos específicos a) Determinar y analizar la influencia de los efectos del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en los parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima bajo esfuerzos de compresión triaxial UU. b) Determinar los porcentajes de incremento de la capacidad portante del suelo crítico con el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima a través del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos. c) Determinar los porcentajes de índice CBR que alcanza el uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima.	Hipótesis específicos a) El efecto del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos en los parámetros de resistencia para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima bajo esfuerzos de compresión triaxial UU es significativo. b) La capacidad portante del suelo crítico se incrementa hasta porcentajes superiores a 200% con el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima a través del uso de distintos métodos de estabilización y tipos de suelos. c) Al menos, una combinación de un método de estabilización y un tipo de suelos para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla-Lima logra alcanzar superar el 150% del índice CBR.				

7.9 Planos geotécnicos





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA			
PROYECTO DE TESIS: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"			
PLANO: PLANO PERFIL ESTRATIGRÁFICO GEOTÉCNICO			N° LAMINA:
UBICACIÓN: DISTRITO DE VENTANILLA, PROVINCIA DEL CALLAO, DEPARTAMENTO DE LIMA			PE-01
AREA:	PERIMETRO:	ELABORADO: Ing. Bach. CFO	
ESCALA:	FECHA:	PROPIETARIO:	
INDICADA	OCT_2022	REFINERIA-LA-PAMPILLA-SAA	



PERFIL ESTRATIGRÁFICO GEO TÉCNICO DE SUB RASANTE MEJORADA CON ANILLO DE SECCIÓN TRAPEZOIDAL

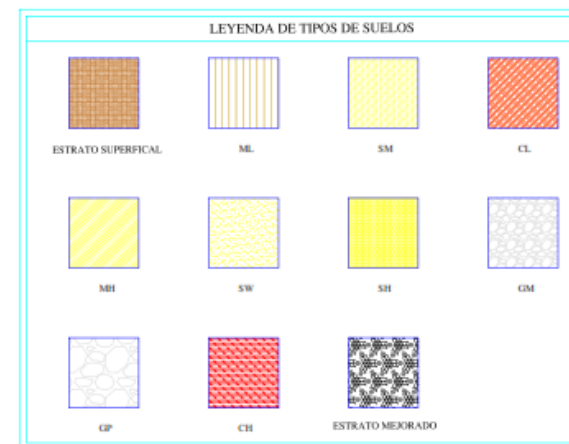
CORTE SECCIÓN A - A

ESCALA: 1/350



DETALLE DE SECCIÓN Y TRATAMIENTO ÓPTIMO

ESCALA: 1/200



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA			
PROYECTO DE TESIS:			
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"			
PLANO:	PLANO PERFIL ESTRATIGRÁFICO GEOTÉCNICO DE SUELO ESTRUCTURA MEJORADA ÓPTIMA		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE VENTANILLA, PROVINCIA DEL CALLAO, DEPARTAMENTO DE LIMA		
AREA:	PERIMETRO:	ELABORADO:	REVISADO:
ESCALA:	FECHA:	PROPIETARIO:	REFINERÍA-LA PAMPILLA-SAA
INDICADA:	OCT_2022		
			N° LAMINA: PE-02



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA N° 009-2024-FIMGC: ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, a los 26 días del mes de enero de 2024, siendo las 04:00PM, reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, bajo la presidencia del MSc. Edward LEÓN PALACIOS en representación del Decano de la FIMGC y los miembros MSc. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS, Mg. Ángel Hugo VÍLCHEZ PEÑA, Dr. Hemerson LIZARBE ALARCÓN, actuando como secretario docente el MSc. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

CARLOS FALCONI ORÉ

Quien presentó la tesis denominada:

**"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN
CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA
PAMPILLA"**

Los señores miembros del jurado, luego de expuesto el tema y absueltas las preguntas, lo declaran:

APROBADO, CON NOTA 16 (DIECISEIS)

Siendo las 05:15 PM del día 26 de enero de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis. Firman los miembros del jurado de tesis en señal de conformidad.

Mg. Edward LEÓN PALACIOS
Presidente

Mg. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Miembro

Mg. Ángel Hugo VÍLCHEZ PEÑA
Miembro

MSc. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ
Secretario docente de la FIMGC

Dr. Hemerson LIZARBE ALARCÓN
Miembro

cc:
Archivo



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 124-2024-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 476-2023-FIMGC-UNSCH-D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : CARLOS FALCONI ORÉ
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA EL MEJORAMIENTO DE TERRENO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE TANQUES PARA HIDROCARBUROS EN LA PAMPILLA"
Evaluación de la Originalidad : 11 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2520627830

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 15 de noviembre del 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil


Msc. Ing. Alex Sander IBCAÑAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

"Estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla"

por CARLOS FALCONI ORÉ

Fecha de entrega: 15-nov-2024 11:21a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2520627830

Nombre del archivo: TE_CARLOS_FALCONI_OR.pdf (15.31M)

Total de palabras: 56539

Total de caracteres: 306704

"Estabilización de suelos para el mejoramiento de terreno en cimentaciones superficiales de tanques para hidrocarburos en la Pampilla"

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

2%

2

doku.pub

Fuente de Internet

1%

3

cybertesis.uni.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

4

repositorio.unc.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

5

documentop.com

Fuente de Internet

<1%

6

idoc.pub

Fuente de Internet

<1%

7

www.ceteau.com

Fuente de Internet

<1%

8

repositorio.upn.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

9	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
10	dialnet.unirioja.es Fuente de Internet	<1 %
11	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
12	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
14	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
15	licitacions.bcn.cat Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	archive.org Fuente de Internet	<1 %
18	www.stasoil.com Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.puce.edu.ec	

<1 %

21

pdfcoffee.com

Fuente de Internet

<1 %

22

repositorio.unh.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

23

repositorio.upla.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

24

repositorio.uancv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

25

idus.us.es

Fuente de Internet

<1 %

26

ri.ues.edu.sv

Fuente de Internet

<1 %

27

INSIDEO SOCIEDAD ANONIMA CERRADA -
INSIDEO S.A.C.. "EIA-SD del Proyecto Línea de
Transmisión Eléctrica 220 kV Montalvo - Los
Héroes y Subestaciones Asociadas-
IGA0006865", R.D. N° 565-2017-MEM/DGAAE,
2020

Publicación

<1 %

28

www.issmge.org

Fuente de Internet

<1 %

29

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1 %

30	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
31	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
32	myslide.es Fuente de Internet	<1 %
33	GREEN ENVIRONMENT S.A.C.. "Actualización del EIA de la Planta Industrial dedicada a la Fabricación de Productos Metálicos para Uso Estructural de la Empresa Fera Perú-IGA0012313", R.D. N° 331-2019-PRODUCE/DVMYPE-I/DGAAMI, 2020 Publicación	<1 %
34	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
35	"Demanda sísmica sobre pilotes en sitios propensos a lateral spreading inducido por licuación.", Pontificia Universidad Catolica de Chile, 2017 Publicación	<1 %
36	luisdoubrontgschool.files.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %
37	repositorio.ucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
38	repository.unad.edu.co Fuente de Internet	<1 %

39	www.repositorio.usac.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
40	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
41	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1 %
42	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
43	repositorio.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
44	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
45	Submitted to Submitted on 1689172702741 Trabajo del estudiante	<1 %
46	CLB TECNO LOGICA S.A.C. "ITS del Proyecto de Modificaciones en Islas de Despacho-IGA0015672", R.D. N° 031-2016-MEM/DGAEE, 2022 Publicación	<1 %
47	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
48	dspace.ucacue.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
49	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo