

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**EFFECTO DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON
TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO MATERIAL DE
REFUERZO EN LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES DEL DISTRITO DE PUNO.**

TESIS

PRESENTADA POR:

SIDNEY JOAQUIN ZENTENO ENRIQUEZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTO DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON
TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO MATERIAL DE REFUERZO EN
LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE
PUNO.**

TESIS PRESENTADA POR:

SIDNEY JOAQUIN ZENTENO ENRIQUEZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL



APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

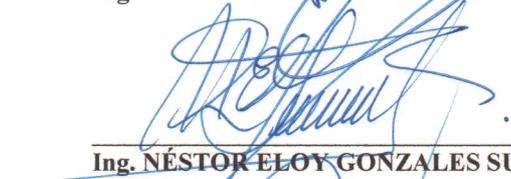
PRESIDENTE:


Ing. RAÚL FERNANDO ECHEGARAY CHAMBI

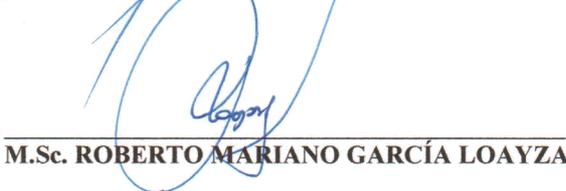
PRIMER MIEMBRO:


Ing. JOSÉ LUIS CUTIPA ARAPA

SEGUNDO MIEMBRO:


Ing. NÉSTOR ELOY GONZALES SUCASAIRE

DIRECTOR / ASESOR:


M.Sc. ROBERTO MARIANO GARCÍA LOAYZA

TEMA: Estabilización de suelos.

ÁREA: Transportes.

LÍNEA DE INVESTIGACION: Transportes y gestión vial.

FECHA DE SUSTENTACIÓN 02 DE OCTUBRE DEL 2018

DEDICATORIA

A Dios.

Por darme vida y salud hasta este momento, ayudándome incondicionalmente en cumplir todas mis metas trazadas, sumado a ello su infinita bondad y amor.

A mi madre Ninfa Enríquez y a mi padre Andrés Zenteno (QEPD).

Por ser quienes me dieron la vida, por su amor incondicional, por sus enseñanzas para hacerme un hombre de bien, por su apoyo del día a día, por la motivación y la fuerza que significan para mí, siendo cada uno la razón de mi existir.

Dedico esta tesis “Al hombre que, a pesar de nuestra distancia física mas no espiritual, lo siento siempre a mi lado y veo que todo lo que pudiste enseñarme me hizo un hombre digno. Gracias papá”.

Dedico esta tesis “A la mujer que, a pesar de no tener a su compañero de la vida al lado, pudo sacar adelante a toda la familia. Sabes que de quien hablo eres tú Mamita”.

A mis familiares.

A mi abuela Francisca Tavera (QEPD) por ser la mujer que me dio más de lo que merecía y que, a pesar de nuestra distancia física mas no espiritual, siento que está a mi lado siempre y aunque nos faltó muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ella como lo es para mí. A mis abuelos Moisés Enríquez y Juan de Dios Zenteno por ser mis fieles alentadores, a mi tío Manuel por ser como mi padre, a mi tía Zaida por ser como mi segunda mamá, a mi tía María Elena por ser tan colaboradora cuando la necesite, a mi tío Alfredo por ser mi amigo desde pequeño, a mi hermano Luis por ser mi mejor amigo de toda la vida, a mis hermanas Marilia y Marcela por ser el motivo de querer ser un hombre ejemplar para ellas y, por último, pero no menos importante a Gleny que supo darme su apoyo incondicional cuando no tenía a quien acudir y por ser una persona digna de admirar a pesar de las adversidades.

¡Gracias a ustedes!

AGRADECIMIENTOS

El amor entregado, la paciencia y la motivación que cada día recibo de mi familia, por el desarrollo de la presente tesis, es simplemente impresionante y se refleja en lo que yo soy como persona y profesional.

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza necesaria, por guiarme y cuidarme, al igual que a mi mamá Avelina Ninfa Enríquez Tavera por su amor y apoyo incondicional.

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano por ser la entidad que me formó en sus ambientes como profesional, a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano, y en especial a mi director de Tesis M.Sc. Ingeniero Roberto Mariano García Loayza quien, con toda su sapiencia, tolerancia y sabios consejos, estuvo predispuesto en todo momento para el asesoramiento y apoyo de la presente tesis. A mis jurados por su tiempo, predisposición y consejos tan acertados, Ingeniero Raúl Fernando Echegaray Chambi, Ingeniero José Luis Cutipa Arapa e Ingeniero Néstor Eloy Gonzales Sucasaire.

Agradezco a toda mi familia, a mis padres, abuelos, tíos y hermanos por ser los principales gestores de mis sueños, gracias por confiar y creer en mí. Por cada día junto a mí, por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que están gravadas en mi mente.

Gracias a Gleny por su apoyo en todo tanto en momentos buenos y malos, que a pesar de sus problemas siempre estuvo ahí, dándome la fuerza que a ratos necesitaba.

Gracias a mis amigos y compañeros de la Universidad, por compartir sus conocimientos, experiencias y anécdotas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	14
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	16
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
CAPÍTULO I.....	19
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.2.1 Problemas Específicos	20
1.3 JUSTIFICACION DEL ESTUDIO.....	20
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
1.4.1 Objetivo General	22
1.4.2 Objetivos Específicos.....	22
1.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
1.5.1 Hipótesis General.....	23
1.5.2 Hipótesis específicas	23
1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	23
CAPITULO II	26
2. REVISIÓN DE LITERATURA	26
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
2.2 EL SUELO.....	33
2.2.1. Definición de suelo y usos.....	33
2.2.2. La Mecánica de Suelos, la Ingeniería de Suelos y la Ingeniería Geotécnica.....	33
2.2.3. Clasificación de suelos.....	33
2.3 PAVIMENTOS, CONSTITUCIÓN Y CONCEPTOS GENERALES.....	43
2.3.1 Características que debe reunir un pavimento	43
2.3.2 Funciones de la estructura de Pavimentos	43
2.3.3 Tipos de pavimentos	44
2.3.4 Factores de diseño de pavimentos	45
2.3.5 Componentes de la infraestructura del camino.....	46

2.3.6	Esfuerzos y deformación en la estructura del pavimento ocasionado por los vehículos.	49
2.4	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	52
2.4.1	Criterios geotécnicos para establecer la estabilización de suelos	52
2.4.2	Métodos para el mejoramiento de suelos	54
2.5	CONGELAMIENTO DE SUELOS	60
2.5.1	Aspectos de la congelación del Suelo.	61
2.5.2	Propiedades físicas de los suelos congelados.	63
2.5.3	Características mecánicas del suelo congelado y propuestas para su evaluación en laboratorio.	64
2.5.4	El congelamiento de suelos, factor importante en zonas altas.....	67
2.5.5	Acción de las heladas en los suelos.	67
2.5.6	Clasificación de acuerdo a la susceptibilidad de los suelos a las heladas. 68	
2.5.7	Índice de congelación.	69
2.5.8	Daño del congelamiento al suelo de fundación de pavimentos.	71
2.6	POLIETILENO TEREFALATO (PET).....	72
2.6.1	Introducción.....	72
2.6.2	Definición.....	73
2.6.3	Cualidades del Tereftalato de Polietileno (PET).	74
2.6.4	El PET y su situación en el Perú	77
2.6.5	Generalidades sobre contaminación por residuos sólidos.	79
2.6.6	Evaluación económica de uso y disponibilidad del PET en Puno.	81
2.6.7	Ventajas Ambientales del reciclado de PET	92
	CAPÍTULO III	93
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	93
3.1	TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN	93
3.2	ÁMBITO DE ESTUDIO	93
3.2.1	Ubicación de la muestra	93
3.2.2	Población y Muestra	94
3.3	MATERIALES	94
3.3.1	Tereftalato de Polietileno (PET).....	94
3.3.2	Material de cantera	100
3.3.3	Equipos de laboratorio	102
3.4	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	106
3.4.1	Para la obtención del grupo control.....	106

3.4.2	Para determinar el efecto de la adición de Tereftalato de Polietileno en los parámetros de resistencia de suelos finos.....	107
3.4.3	Trabajo de campo in situ.....	107
3.4.4	Trabajo de Laboratorio.....	111
3.5	METODOS ESTADÍSTICOS.....	155
3.5.1	Coeficiente de correlación de Pearson.....	157
3.5.2	Coeficiente de correlación de Spearman.....	159
3.5.3	Prueba de Hipótesis.....	160
3.5.4	Prueba de Hipótesis para la Correlación con Pearson.....	160
3.5.5	Prueba de Hipótesis para la Correlación con Spearman.....	161
3.5.6	P-valor de un contraste o prueba de hipótesis.....	162
	CAPÍTULO IV.....	163
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	163
4.1	ANÁLISIS Y CARACTERÍSTICAS INICIALES DEL SUELO NATURAL EN ESTUDIO.....	163
4.2	ANÁLISIS Y CARACTERÍSTICAS FÍSICO MECÁNICAS DE SUELO FINO CON ADICIÓN DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET).....	168
4.2.1	Densidad seca máxima, Contenido de humedad óptimo.....	169
4.2.2	Parámetros de resistencia al corte del suelo (CBR).....	172
4.3	RESULTADOS DE CORRELACIONES Y PRUEBA DE HIPÓTESIS... ..	182
4.3.1	Correlación de la Máxima Densidad Seca y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.....	183
4.3.2	Correlación del Contenido de Humedad Óptimo y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.....	185
4.3.3	Correlación del CBR a los 12 golpes de compactación al 100% de la máxima densidad seca y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.....	187
4.3.4	Correlación del CBR a los 25 golpes de compactación al 100% de la máxima densidad seca y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.....	190
4.3.5	Correlación del CBR a los 56 golpes de compactación al 100% de la máxima densidad seca y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.....	193
	CAPÍTULO V.....	197
5.	CONCLUSIONES.....	197
	CAPÍTULO VI.....	198
6.	RECOMENDACIONES.....	198
	CAPÍTULO VII.....	199
7.	REFERENCIAS.....	199
	ANEXOS.....	203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Deficiencias encontradas en obra por mala calidad de suelos existentes.....	22
Figura 2.1: Esquema de distribución de tipos de suelo.....	36
Figura 2.2: Calidad de subrasante según índice de grupo.....	37
Figura 2.3: Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 Y A-7.	38
Figura 2.4: Grafica de Plasticidad.....	40
Figura 2.5: Diagrama de flujo para los nombres de los grupos de grava y arena del suelo	41
Figura 2.6: Diagrama de flujo de nombres de los grupos para limo inorgánico y suelos arcillosos.	42
Figura 2.7: Diagrama de flujo de nombres de los grupos para limoso orgánico y suelos arcillosos.	42
Figura 2.8: Sección transversal tipo a media ladera para una autopista en tangente	45
Figura 2.9: Factores de diseño de pavimentos	46
Figura 2.10: Parámetros de caracterización de carga de la AASHTO 93.....	49
Figura 2.11: Comportamiento y respuestas del pavimento frente a cargas. (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.....	50
Figura 2.12: Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta. (a) Baja presión; (b) Alta presión.	51
Figura 2.13: Congelación natural del suelo.	62
Figura 2.14: Daños producidos en una carretera durante la época de deshielo.	62
Figura 2.15: Curvas de fluencia de arena media congelada en ensayos de compresión simple.....	65
Figura 2.16: Variación de la resistencia a compresión simple en función del tiempo. ..	66
Figura 2.17: Resistencia a compresión simple de varios suelos congelados. (Datos tomados de Nanosov, 1968).....	66
Figura 2.18: Trochas carrozables congeladas en Laraqueri-Puno, Perú.....	68
Figura 2.19: Susceptibilidad de los suelos a la helada.....	69
Figura 2.20: Determinación del índice de congelación (Ic).....	70
Figura 2.21: Penetración de la congelación en función del Ic.	71
Figura 2.22: Códigos, propiedades y usos de los plásticos.....	73
Figura 2.23: Diagrama de flujo para la producción del PET.	76
Figura 2.24: Proveedores de Resinas PET (% de participación)	78
Figura 2.25: Consume de resinas PET (miles de TM).....	79
Figura 2.26: Ciclo de producción de los RR.SS.	83
Figura 2.27: Distribución de porcentajes de residuos sólidos que se desecha en los basureros de las viviendas de la ciudad de Puno.	83
Figura 2.28: Sección de pavimento flexible, tomado para el análisis de disponibilidad de PET.	89
Figura 2.29: Vista en planta de pavimento, tomado para el análisis de disponibilidad de PET.	89
Figura 2.30: Almacenamiento de PET de la empresa de reciclaje “Marvel Pacha” ubicado en la Ciudad de Juliaca.....	92

Figura 3.1: Depósito, Almacén y planta de reciclaje de gran variedad de Plásticos, ubicado en la ciudad de Juliaca.....	94
Figura 3.2: Acumulación de plástico del tipo 1 (Tereftalato de Polietileno-PET), comúnmente conocido como botellas de plástico.....	95
Figura 3.3: Contenedor de PET ubicado en la Universidad Nacional del Altiplano Puno.	95
Figura 3.4: PET cortado listo para su picado.....	96
Figura 3.5: PET picado al tamaño requerido (4.5 mm aproximadamente).....	96
Figura 3.6: PET picado en sus condiciones iniciales, elaborado por la empresa RESITEC.	97
Figura 3.7: Lavado de PET, retiro de etiquetas y demás contaminantes del plástico.....	97
Figura 3.8: Esgurrimiento y proceso de secado de PET después del lavado.	97
Figura 3.9: PET lavado secado y listo para su uso en laboratorio.	98
Figura 3.10: Tamizado del PET por la malla N°4 y N°10.....	98
Figura 3.11: PET final tamizado pasante malla N°4 y retenido malla N°10.....	98
Figura 3.12: Mapa de acceso a la cantera de Salcedo.....	101
Figura 3.13: Ubicación de la extracción de la muestra.....	101
Figura 3.14: Reconocimiento de cantera a explotar. (Cantera Salcedo).....	107
Figura 3.15: Muestreo de Cantera Salcedo a 1.70m de profundidad.....	108
Figura 3.16: Extracción de material de cantera. (Calicata N°1).....	108
Figura 3.17: Excavación y extracción de material con retroexcavadora. (Calicata N°1-2-3-4).....	109
Figura 3.18: Carguío de material extraído para realización de ensayos en laboratorio.....	109
Figura 3.19: Material extraído de cantera Salcedo, 30 sacos de 25Kg c/u.....	110
Figura 3.20: Disgregación de material de cantera con comba de goma.	110
Figura 3.21: Secado de material de cantera para pruebas de laboratorio.	110
Figura 3.22: Muestra de suelo debidamente sellado para evitar pérdida de humedad.	114
Figura 3.23: Muestras de suelo húmedo para el ensayo (03 muestras).	114
Figura 3.24: Pesado de muestras de suelo en estado húmedo.	115
Figura 3.25: Secado de muestras húmedas de suelo anteriormente pesadas en horno eléctrico durante 24 horas a 110±5 °C.	115
Figura 3.26: Pesado y registro de muestras en estado seco, después de 24 horas.	115
Figura 3.27: Cuarteo de muestra mediante cuarteador mecánico.	116
Figura 3.28: Elección de la porción más representativa de muestra cuarteada, para posteriormente lavar la muestra elegida.	116
Figura 3.29: Lavado de muestra elegida utilizando el tamiz N° 200.....	116
Figura 3.30: Secado de la muestra durante 18 horas en horno eléctrico a 110°C después de su lavado, pesando y registrando ese dato antes del tamizado.....	117
Figura 3.31: Juego de tamices debidamente ordenados para el ensayo de granulometría.	117
Figura 3.32: Vertimiento de la muestra en los tamices, agitándolos enérgicamente para permitir la gradación.	117
Figura 3.33: Pesado y registro de las porciones retenidas en cada tamiz.	118
Figura 3.34: Análisis granulométrico terminado, mostrando los diferentes tamaños de partículas de la muestra en estudio.	118
Figura 3.35: Tamizado por la malla N° 40 aproximadamente 250 gramos de muestra disgregada y seca.	119

Figura 3.36: Saturación durante 24 horas del material tamizado anteriormente.	119
Figura 3.37: Muestra saturada y expedita para realizar el ensayo de límite líquido.....	119
Figura 3.38: Cuchara de casa Grande con muestra después de N N° de golpes y surco unido.	120
Figura 3.39: Extracción de surco de suelo que se unió después de los golpes.	120
Figura 3.40: Secado de muestras en horno eléctrico durante 24 horas a 110°C, registrando sus pesos antes y después de su secado.	120
Figura 3.41: Tamizado por la malla N°40 y saturado de muestra durante 24 hr.....	121
Figura 3.42: Porciones de muestra para formar rollitos del diámetro de la mina de lapicero aproximadamente.	121
Figura 3.43: Formación de rollitos de material seleccionado antes de su fractura.	121
Figura 3.44: Pesado y registro de rollitos de 3.2 mm de diámetro aproximadamente..	122
Figura 3.45: Secado de muestras en horno eléctrico durante 24 horas a 110°C, registrando sus pesos antes y después de su secado.	122
Figura 3.46: Materiales y equipos utilizados en el ensayo Proctor modificado.	123
Figura 3.47: Material disgregado y secado a temperatura ambiente.	123
Figura 3.48: Tamizado de muestra para elección de método de Proctor Modificado a utilizar.	123
Figura 3.49: Tamizado de muestra después de elección de método. (5400 gr/punto aprox.).....	124
Figura 3.50: Dosificación de material seleccionado y agua para cada punto del ensayo.	124
Figura 3.51: Mezcla y homogenización de suelo y agua en proporciones calculadas..	124
Figura 3.52: Material expedito para compactación con pisón a 56 golpes en 5 capas.	124
Figura 3.53: Pisón de 44.5 N, produciendo energía de compactación de 2700 kN-m/m3.	125
Figura 3.54: Compactación de muestra distribuida en 5 capas.....	125
Figura 3.55: Enrazado y registro de peso de molde más suelo compactado.	125
Figura 3.56: Muestra compactada y secado en horno eléctrico durante 24 horas a 110°C.	125
Figura 3.57: Materiales, equipos e Insumos a utilizar en ensayo Proctor Modificado.	126
Figura 3.58: Tereftalato de Polietileno lavado, secado y tamizado.	126
Figura 3.59: Dosificación de PET (6% del peso seco de la muestra) del mismo modo para los demás porcentajes.	126
Figura 3.60: Dosificación de agua distinto para cada punto del ensayo.	127
Figura 3.61: Insumos (agua, PET, suelo) dosificados según cálculos del investigador.	127
Figura 3.62: Vertimiento de PET y agua para su mezcla con suelo en las proporciones calculadas.....	127
Figura 3.63: Homogenización de mezcla de suelo, PET y agua.....	128
Figura 3.64: PET al 6% y agua al 13% del peso seco del suelo.	128
Figura 3.65: PET al 8% y agua al 13% del peso seco del suelo.	128
Figura 3.66: PET al 10% y agua al 13% del peso seco del suelo.	128
Figura 3.67: Suelo, PET y agua debidamente mezclados y homogenizados.....	129
Figura 3.68: Muestra separada en 5 capas para su compactación.	129
Figura 3.69: Compactación de la quinta capa de muestra con pisón de 44.5 N.	129
Figura 3.70: Muestra con PET compactada a 56 golpes cada capa.	130

Figura 3.71: Enrazado de muestra para su pesado.....	130
Figura 3.72: Pesado y registro de muestra con PET compactada.	130
Figura 3.73: Extracción de muestra con PET para su pesado y secado en horno eléctrico.	130
Figura 3.74: Cálculo de Densidad Seca Máxima y Contenido Óptimo de Humedad. .	134
Figura 3.75: Materiales y equipos utilizados en el ensayo de CBR.	135
Figura 3.76: Papel filtro que se utiliza para cubrir la base y la superficie de la muestra dentro del molde.	135
Figura 3.77: Disgregación y tamizado de material para su uso en el ensayo de CBR.	136
Figura 3.78: Medición del diámetro, altura y peso de los moldes de CBR.	136
Figura 3.79: Molde CBR con disco espaciador en su base.....	136
Figura 3.80: Molde CBR con disco espaciador y papel filtro en la base.....	137
Figura 3.81: Muestra preparada con la humedad obtenida en el ensayo de Proctor.....	137
Figura 3.82: Muestra expedita para su compactación a 12, 25 y 56 golpes.	137
Figura 3.83: Moldes CBR a 12, 25 y 56 golpes enrazados, con papel filtro en la base y parte superior del molde como también muestras para controlar la humedad propuesta.	138
Figura 3.84: Sumergido de moldes en agua para control de su deformación durante 4 días.	138
Figura 3.85: Moldes CBR sumergidos con sus respectivas pesas y vástagos.	138
Figura 3.86: Muestras secas obtenidas del ensayo de CBR para control de humedad.	139
Figura 3.87: Medición de la deformación cada 24 horas durante 4 días con deformímetro.	139
Figura 3.88: Ecurrimiento de moldes CBR después de 4 días de sumergidos.....	139
Figura 3.89: Retiro de papel filtro para proceder a prueba en prensa manual para CBR.	140
Figura 3.90: Colocado de molde CBR en prensa.....	140
Figura 3.91: Penetración a molde CBR de 12, 25 y 56 golpes en prensa CBR.....	140
Figura 3.92: Inicio de ensayo CBR, giro del mango de la prensa a razón de 1.27 mm/min.....	141
Figura 3.93: Registro de los esfuerzos a determinada deformación propuesto según norma.	141
Figura 3.94: Moldes CBR ensayados con suelo en condiciones naturales, después de penetración a 1.27mm/min.	141
Figura 3.95: Materiales, equipos e insumos a utilizar en el ensayo CBR.....	143
Figura 3.96: Disgregación de material de cantera.	143
Figura 3.97: Selección de material de cantera (Tamizado).	143
Figura 3.98: Suelo con agente estabilizador al 1.5% de PET.	144
Figura 3.99: Suelo con agente estabilizador al 2% de PET.	144
Figura 3.100: Suelo con agente estabilizador al 6% de PET.	144
Figura 3.101: Suelo con agente estabilizador al 8% de PET.	145
Figura 3.102: Suelo con agente estabilizador al 10% de PET.	145
Figura 3.103: Mezclado y homogenizado de suelo, PET y agua.....	145
Figura 3.104: Suelo, PET al 2% y agua al 14.5% mezclado y homogenizado.....	146
Figura 3.105: Suelo, PET al 6% y agua al 14.5% mezclado y homogenizado.....	146
Figura 3.106: Muestra dividida en 5 capas expedita para compactación a 12, 25 y 56 golpes.....	146

Figura 3.107: Compactación de muestra con pisón de 44.5 N.	147
Figura 3.108: Enrazado con regla metálica una vez terminado la compactación.	147
Figura 3.109: Muestras compactados y registrados para su inmersión durante 4 días en agua.	147
Figura 3.110: Muestras compactados a 12, 25 y 56 golpes preparados para su inmersión.	148
Figura 3.111: Muestras obtenidas de los moldes CBR para control de su humedad... ..	148
Figura 3.112: Muestras listas para ser sumergidos en pozas con agua durante 4 días.	148
Figura 3.113: Primera lectura de la deformación de muestra compactada.	149
Figura 3.114: Lectura con deformímetro cada 24 horas de muestras compactadas.	149
Figura 3.115: Retiro de muestras después de 4 días de estar sumergidas.	149
Figura 3.116: Esgurrimiento de muestras sumergidas durante 15 minutos.	149
Figura 3.117: Superficie de muestra compactada con PET lista para ser ensayada en prensa.	150
Figura 3.118: Colocado de sobrepeso en la superficie de muestra compactada.	150
Figura 3.119: Muestra y molde CBR en prensa manual de CBR.	150
Figura 3.120: Funcionamiento de prensa manual a 1.27 mm/min y registro de esfuerzos.	151
Figura 3.121: Muestra con PET después de ser ensayada en prensa CBR.	151
Figura 3.122: Curvas CBR corregidas a 12, 25 y 56 golpes al 0% de PET.	154
Figura 3.123: Valores de presiones de la muestra patrón en ensayo de CBR.	154
Figura 3.124: Curva de diseño CBR – Densidad Seca al 0% de PET.	155
Figura 3.125: Región de rechazo en una prueba de hipótesis bilateral.	162
Figura 4.1: Curva Granulométrica de suelo fino en estudio.	164
Figura 4.2: Gráfica de limite liquido de suelo fino en estudio.	164
Figura 4.3: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 0% de PET.	166
Figura 4.4: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 0% de PET).	167
Figura 4.5: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 0% de PET (Ensayo N°01).	167
Figura 4.6: Curvas de compactación a distintos porcentajes de PET propuestos.	169
Figura 4.7: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 2% de PET.	170
Figura 4.8: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 4% de PET.	171
Figura 4.9: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 6% de PET.	171
Figura 4.10: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 8% de PET.	171
Figura 4.11: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 10% de PET.	172
Figura 4.12: Curvas CBR al 100% de la DSM a distintos porcentajes de PET.	175
Figura 4.13: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 2% de PET).	176
Figura 4.14: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 2% de PET (Ensayo N°01).	176

Figura 4.15: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 4% de PET).....	177
Figura 4.16: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 4% de PET (Ensayo N°01).....	177
Figura 4.17: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 6% de PET).....	178
Figura 4.18: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 6% de PET (Ensayo N°01).....	178
Figura 4.19: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 8% de PET).....	179
Figura 4.20: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 8% de PET (Ensayo N°01).....	179
Figura 4.21: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 10% de PET).....	180
Figura 4.22: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 10% de PET (Ensayo N°01).....	180
Figura 4.23: Curva Densidad Seca Máxima vs % de PET.	183
Figura 4.24: Curva Contenido Óptimo de Humedad vs % de PET.	185
Figura 4.25: Gráfica de evolución del CBR a 12 golpes de compactación para diferentes porcentajes de PET.	187
Figura 4.26: Curva mejorada de CBR a 12 golpes de compactación vs % de PET.	190
Figura 4.27: Gráfica de evolución del CBR a 25 golpes de compactación para diferentes porcentajes de PET.	190
Figura 4.28: Curva mejorada de CBR a 25 golpes de compactación vs % de PET.	193
Figura 4.29: Gráfica de evolución del CBR a 56 golpes de compactación para diferentes porcentajes de PET.	193
Figura 4.30: Curva mejorada de CBR a 56 golpes de compactación vs % de PET.	196

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Matriz de consistencia: Objetivo General	24
Tabla 1.2: Matriz de Consistencia: Objetivos Específicos	24
Tabla 2.1: Clasificación de materiales de carreteras subrasantes	37
Tabla 2.2: Sistema unificado de clasificación de suelo (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75).....	40
Tabla 2.3: Características más relevantes del PET	74
Tabla 2.4: Métodos de degradado de PET	77
Tabla 2.5: Composición promedio nacional de los residuos sólidos en el Perú.	80
Tabla 2.6: Generación de residuos sólidos municipales de la ciudad de Puno.....	84
Tabla 2.7: Generación de Residuos de ámbito No Municipal. Cantidad Semanal Acumulada Generada (kg/semana).....	84
Tabla 2.8: Generación de residuos sólidos municipales en la ciudad de Puno.....	85
Tabla 2.9: Composición física de los residuos sólidos en la ciudad de Puno.	86
Tabla 2.10: Generación de Residuos Sólidos en la ciudad de Puno, según Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos, 2013-2018.....	87
Tabla 2.11: Precios referenciales de Residuos Sólidos Reaprovechables (No incluye IGV).....	90
Tabla 2.12: Valorización de los residuos sólidos reaprovechables de la Municipalidad Provincial de Puno.	90
Tabla 3.1: Especificaciones Técnicas de Tereftalato de Polietileno.....	99
Tabla 3.2: Cantidad de muestra extraída para la realización de ensayos de laboratorio.	102
Tabla 3.3: Número de golpes de compactación en las normas actualmente disponibles para el ensayo CBR.....	112
Tabla 3.4: Cantidad de insumos para ensayo CBR al 0% de PET.....	135
Tabla 3.5: Cantidad de insumos para ensayo CBR a diferentes porcentajes de PET... ..	142
Tabla 3.6: Flujoograma para elegir la prueba estadística adecuada.	156
Tabla 3.7: Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.	158
Tabla 3.8: Grado de relación según coeficiente de correlación de Sperman.	159
Tabla 3.9 Identificación de Hipótesis.	160
Tabla 4.1: Características Granulométricas del suelo natural.....	163
Tabla 4.2: Características Físico Mecánicas del suelo en estudio.	165
Tabla 4.3: CBR de suelo fino en su estado inicial.	166
Tabla 4.4: Expansión de suelo fino en su estado inicial.	168
Tabla 4.5: Densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo de suelo fino en estudio a diferentes porcentajes de PET.	169
Tabla 4.6: CBR de suelo fino en estudio a diferentes porcentajes de PET.....	172
Tabla 4.7: CBR promedio de suelo fino en estudio a diferentes porcentajes de PET. .	174
Tabla 4.8: Expansión de suelo fino con adición de PET en porcentajes propuestos... ..	181
Tabla 4.9: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y DSM.	183
Tabla 4.10: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y DSM.	184
Tabla 4.11: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y CHO.	185
Tabla 4.12: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y CHO.	186
Tabla 4.13: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y CBR a 12 golpes. ...	188
Tabla 4.14: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y CBR a 12 golpes.....	188

Tabla 4.15: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y CBR a 25 golpes. ...	191
Tabla 4.16: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y CBR a 25 golpes.....	191
Tabla 4.17: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y CBR a 56 golpes. ...	194
Tabla 4.18: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y CBR a 56 golpes.....	194

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

UNA: Universidad Nacional del Altiplano

PET: Tereftalato de Polietileno

CBR: California Bearing Ratio

MTC: Ministerios de Transportes y Comunicaciones

NTP: Norma Técnica Peruana

PVC: Policloruro de Vinilo

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

IG: Índice de grupo

LL: Límite Líquido

LP: Límite Plástico

CONAM: Consejo Nacional del Ambiente

MINAM: El Ministerio del Ambiente

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

ASTM: American Society for Testing Materials

EM 2000: Manual de Ensayo de Materiales

GC: Grupo de control

GE: Grupo experimental

DSM: Densidad seca máxima

CHO: Contenido de humedad Óptimo

RESUMEN

Durante los últimos años y en la actualidad al año 2018, la producción de residuos sólidos ha aumentado significativamente, causando problemas de salud y medio ambiente. Con el fin de plantear una alternativa para mitigar esta problemática, se investiga la reutilización de envases de Tereftalato de Polietileno (PET) como un agente estabilizador en suelos finos del distrito de Puno. Se busca que el PET mejore las propiedades mecánicas del suelo en estudio. El objetivo de la presente investigación es evaluar el efecto de estabilización de suelo fino con tereftalato de polietileno, con la incorporación de 2, 4, 6, 8 y 10% en peso del agente estabilizador mencionado con relación al peso seco del suelo en estudio, todo ello para conformar la estructura de un pavimento flexible de acuerdo a la normativa peruana vigente. Para el desarrollo de esta investigación, primero se procedió a la obtención de la muestra (suelo fino) de la cantera de Salcedo, distrito Puno, provincia de Puno, región Puno. Posteriormente se analizó el suelo en el laboratorio de suelos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano, con base en las Normas Peruanas. El estudio se centra en un solo tipo de suelo y las variaciones sufridas en sus propiedades mecánicas mediante los ensayos de Proctor Modificado y California Bearing Ratio después del uso del aditivo en mención. Al finalizar la investigación se logró determinar que la capacidad portante (CBR) del suelo fino en su estado natural, es decir, sin adición del estabilizador, fue de 28.91%. Incorporando el estabilizador en los porcentajes de 2, 4, 6, 8 y 10%, se obtuvo los siguientes valores de CBR referido al 100% de la densidad seca máxima: 50.65, 20.39, 19.29, 18.38 y 17.36% respectivamente. Con ello se puede concluir que, al adicionar 2% de PET el suelo en estudio, mejora considerablemente su capacidad de soporte al esfuerzo cortante (CBR), haciéndolo apto para su uso en la capa de Sub rasante y Sub base a nivel de pavimentos flexibles, todo ello de acuerdo a lo requerido por la norma peruana (EG 2013).

Palabras Clave: Estabilización de suelos finos, Tereftalato de polietileno, obras geotécnicas, reciclaje de PET, reducción del impacto ambiental.

ABSTRACT

During the last years and in the actuality at year 2018, the production of solid waste has increased significantly, causing health and environmental problems. In order to propose an alternative to mitigate this problem, the reuse of polyethylene terephthalate (PET) containers as a stabilizing agent in fine soils of the district of Puno is investigated. The aim is for PET to improve the mechanical properties of the soil under study. The objective of the present investigation is to evaluate the effect of stabilization of fine soil with polyethylene terephthalate, with the incorporation of 2, 4, 6, 8 and 10% by weight of the stabilizing agent mentioned in relation to the dry weight of the soil under study, all this to form the structure of a flexible pavement of according to current Peruvian regulations. For the development of this research, we first proceeded to obtain the sample (fine soil) from the Salcedo quarry, Puno district, Puno province, Puno region. Subsequently, the soil was analyzed in the soil laboratory of the Professional School of Civil Engineering of the National University of the Altiplano, based on the Peruvian Standards. The study focuses on a single type of soil and the variations suffered in its mechanical properties through the Modified Proctor and California Bearing Ratio tests after the use of the additive in question. At the end of the investigation it was possible to determine that the carrying capacity (CBR) of the fine soil in its natural state, that is, without addition of the stabilizer, was 28.91%. Incorporating the stabilizer in the percentages of 2, 4, 6, 8 and 10%, the following CBR values were obtained, referring to 100% of the maximum dry density: 50.65, 20.39, 19.29, 18.38 and 17.36% respectively. With this it can be concluded that, by adding 2% of PET to the floor under study, its capacity to support the shear stress (CBR) is considerably improved, making it suitable for use in the subgrade and sub base layer at the level of pavements flexible, all in accordance with the requirements of the Peruvian standard (EG 2013).

Key words: Stabilization of fine soils, polyethylene terephthalate, geotechnical works, recycling of PET, reduction of environmental impact.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un mundo en el que los problemas ambientales son cada vez mayores y más perjudiciales, se tienen que buscar soluciones aprovechando el reciclaje y la reutilización de los desechos sólidos urbanos. Según Romero Nuñez & Ahumada Quimbay (2014) indican: “Reciclar, es actualmente un tema que interesa y preocupa no solamente a las personas sino también a instituciones gubernamentales por la importancia que tiene el proporcionar mejor calidad de vida a nuestra generación y responsablemente a las futuras generaciones.” (P.15)

El crecimiento de la población, las actividades modernas y el consumismo generan un considerable aumento en la cantidad de desechos generados. Hoy en día se fabrica infinidad de productos para satisfacer las diversas necesidades actuales, lo que conlleva a la acumulación de una gran cantidad de desechos. Sumándole a esta problemática la ineficiencia con que los residuos son organizados, el resultado es la contaminación de aguas, suelos y aire, por ende, generando problemas de salud pública y efectos dañinos al ambiente, y a su vez conflictos sociales.

En el Perú los residuos sólidos no han recibido la atención adecuada y algunos factores son los siguientes:

- Recolección de la basura mezclada
- Servicios públicos de recolección de basura ineficientes
- Mala coordinación entre los distintos niveles de gobierno
- Marco jurídico incompleto y labor legislativa con visión particularizada
- Poco interés en materia ecológica y poca cultura de reciclaje en la sociedad

En las construcciones de carreteras generalmente se usan los insumos convencionales, no llegamos a optimizar los materiales que se pueden reciclar y que podrían ayudarnos en mejorar la calidad de nuestro suelo, así mismo no se optimiza el tiempo, el dinero, etc. Es por ello que la construcción de una carretera convencional

genera explotación de canteras en exceso, mayor tiempo de ejecución, y a la vez se eleva los costos de construcción.

En la ejecución de obras de carreteras con el pasar del tiempo nos encontramos con diferentes deficiencias y problemas como, por ejemplo, suelos de mala calidad, afloramientos y niveles freáticos superficiales que conlleven a saturar suelos, etc. Para ello existen soluciones pero que no son económicamente rentables.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué manera influye en las propiedades mecánicas de suelos finos la estabilización de dicho suelo con tereftalato de polietileno para la conformación de la estructura de pavimentos flexibles?

1.2.1 Problemas Específicos

- ¿Cuál es el porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que deberá adicionarse a un suelo fino para lograr la mejora de las propiedades mecánicas de dicho suelo?
- ¿De qué manera influye el tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo de Proctor modificado?
- ¿De qué manera influye el tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo de CBR?

1.3 JUSTIFICACION DEL ESTUDIO

Hoy en día, se pretende utilizar materiales reciclables estabilizadores económicos y duraderos, como es el caso del tereftalato de polietileno (PET), siendo su costo de 0.80 soles/kg en la región de Puno. Según el estudio de Generación de residuos sólidos según el plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos de la provincia de Puno del año 2013, nos indica que solamente en la ciudad de Puno se logra recolectar 93.406 Ton/día de residuos sólidos. De los cuales el 1.84% es PET, haciendo un análisis del tiempo, tendríamos 1.72 Ton/día, 52 Ton/mes y 624 Ton/año. Lo que nos lleva a concluir que se genera cantidades exorbitantes de residuos de PET, los cuales podrían ser utilizados para el objetivo de la presente investigación.

No obstante, se ha investigado poco acerca del PET como agente estabilizador de suelos que conformarían la estructura de un pavimento flexible. Ayudando a mejorar las propiedades de suelos de baja capacidad de soporte, mejorando la vida útil del mismo y proporcionándonos la estabilización necesaria para su comportamiento mecánicamente estable. La justificación del uso del PET se da en 4 niveles importantes:

- **Justificación técnica:** El tereftalato de polietileno tiene propiedades físico-mecánicas excelentes con duraciones largas, además el PET es recolectado de los desechos generados por los ciudadanos, razón por la cual llegan a ser económicos y de fácil uso, no requiriendo mano calificada para su proceso de reciclado y para su uso en la estabilización de suelos para la construcción de carreteras, teniendo resultados muy favorables con el medio ambiente.
- **Justificación económica:** con la aplicación del tereftalato de polietileno se ayuda a la economía del país, con la reutilización de residuos sólidos como son las grandes cantidades de botellas de plástico desechadas. Por consiguiente, las personas podrán reciclar sus botellas desechadas y venderlas, obteniendo así ganancias de sus propios residuos sólidos.
- **Justificación académica:** la aplicación de tereftalato de polietileno, es un tema muy amplio, pues existen diferentes tipos de plásticos los cuales pueden ser reutilizados para diferentes usos, no solo en el sector de la construcción. El PET es motivo de investigación para las diferentes ciencias existentes.
- **Justificación social:** con la aplicación del tereftalato de polietileno en obras civiles, dará el surgimiento indirecto de la cultura de reciclaje, esto beneficiará a la sociedad por el simple hecho de reducir el impacto ambiental y mejorar nuestra calidad de vida.



Figura 1.1: Deficiencias encontradas en obra por mala calidad de suelos existentes.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la estabilización de suelo fino con tereftalato de polietileno en las propiedades mecánicas de dicho suelo para la conformación de la estructura de pavimentos flexibles.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Precisar el porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se adicionara a un suelo fino que logre la mejora de las propiedades mecánicas de dicho suelo.
- Analizar el efecto del tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo de Proctor Modificado.
- Determinar el efecto del tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo de CBR.

1.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Hipótesis General

La estabilización de suelo fino con tereftalato de polietileno mejora sus propiedades mecánicas, siendo útil y beneficioso su uso para la conformación de la estructura de pavimentos flexibles.

1.5.2 Hipótesis específicas

- El porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se adiciona a un suelo fino está en el rango del 6% al 10% del peso seco de la muestra, logrando mejorar las propiedades mecánicas de dichos suelos.
- El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de Proctor Modificado.
- El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

La variable independiente estudiada es el porcentaje de adición de Tereftalato de polietileno en suelo fino, y su incidencia en las propiedades mecánicas de un suelo fino para la conformación de la estructura de un pavimento flexible, siendo ésta la variable dependiente. A continuación, se muestra las tablas 1.1 y 1.2 para un mejor entendimiento.

Tabla 1.1: Matriz de consistencia: Objetivo General

Objetivo	Definición del problema	Hipótesis	Variables	Indicadores	Factor a medir
Evaluar el efecto de la estabilización de suelo fino con tereftalato de polietileno en las propiedades mecánicas de dicho suelo para la conformación de la estructura de pavimentos flexibles.	¿De qué manera influye en las propiedades mecánicas de suelos finos la estabilización de dicho suelo con tereftalato de polietileno para la conformación de la estructura de pavimentos flexibles?	La estabilización de suelo fino con tereftalato de polietileno mejora sus propiedades mecánicas, siendo útil y beneficioso su uso para la conformación de la estructura de pavimentos flexibles.	INDEPENDIENTE Dosificación del agente estabilizador al suelo fino natural. DEPENDIENTE Propiedades mecánicas del suelo Densidad seca máxima (δ_d máx.), capacidad relativa de soporte del suelo (CBR).	Tereftalato de polietileno. Propiedades del suelo con la incorporación de PET.	% de Tereftalato de polietileno. Propiedades mecánicas del suelo Densidad seca máxima (δ_d máx.), capacidad relativa de soporte del suelo (CBR).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.2: Matriz de Consistencia: Objetivos Específicos

Objetivos	Definición del problema	Hipótesis	Variables	Indicadores	Factor a medir
Precisar el porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se adicionara a un suelo fino que logre la mejora de las propiedades mecánicas de dicho suelo	¿Cuál es el porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que deberá adicionarse a un suelo fino para lograr la mejora de las propiedades mecánicas de dicho suelo	El porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se adiciona a un suelo fino está en el rango del 6% al 10% del peso seco de la muestra, logrando mejorar las	INDEPENDIENTE E Dosificación del agente estabilizador al suelo fino natural. DEPENDIENTE Propiedades mecánicas del suelo Densidad	Tereftalato de polietileno. Propiedades del suelo con la	% de Tereftalato de polietileno. Propiedad s mecánicas del suelo.

		mecánicas de dicho suelo?	propiedades mecánicas de dichos suelos.	seca máxima (δd máx.), CBR.	incorporación de PET.		
Analizar el efecto tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo Proctor Modificado.	¿De qué manera influye el tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo Proctor modificado?	El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado en el ensayo de Proctor Modificado.	INDEPENDIENTE	Dosificación del agente estabilizador al suelo fino natural.	Tereftalato de polietileno.	% de Tereftalato de polietileno.	
Determinar el efecto tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo CBR.	¿De qué manera influye el tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo CBR?	El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado en el ensayo de Proctor Modificado.	DEPENDIENTE	Propiedades mecánicas del suelo, capacidad relativa de soporte del suelo (CBR).	Tereftalato de polietileno.	Capacidad relativa de soporte del suelo (CBR).	

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En la ingeniería geotécnica, en el estudio de mecánica de suelos los parámetros de resistencia al corte son el ángulo de fricción y la cohesión. En la ejecución de obras, estos parámetros después de ser evaluados in situ generalmente no son los más favorables para garantizar la calidad de la obra, es por ello que se busca mejorar cualquier clase de suelo que se presente en el área a intervenir mediante agentes estabilizadores de todo tipo.

El tratar de preservar el medio ambiente y mejorar las condiciones ambientales ha obligado a la ingeniería el uso de residuos de plástico para mejorar las propiedades mecánicas y físicas del suelo.

Por otro lado, en la ciudad de Puno se desecha 1.72 Ton/día de botellas de plástico (PET). Es por ello que con este estudio se busca aprovechar todo aquel desecho de PET que genera la ciudad de Puno, transformando cada botella recolectada sin necesidad del uso de mano calificada e incluso de maquinaria especializada. Combinando esta transformación del PET con suelo fino de la región de Puno, se busca lograr resultados óptimos en el mejoramiento de este tipo de suelos.

(Pilco Villagra, 2012) afirma en la tesis “USO DE BOTELLAS RECICLABLES PET Y SU APLICACIÓN EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES PARA SUELOS FRICCIONANTES EN LA CIUDAD DE PUNO-PERU 2011”

El empleo de elementos prefabricados permite realizar los trabajos de puesta en obra con una reducción de tiempo y costo, y una mejora en la calidad final de la estructura, desde un punto de vista estructural y estético. Además, esta técnica permite una reducción del impacto medio ambiental, debido a la posibilidad de dar distintos acabados superficiales a la estructura. (s/n) Las botellas PET son hechas de material fuerte, peso ligero y poliéster, el cual tienen una degradación muy lenta pudiendo superar los 300 años de vida. (P.6) En el año 1995 la producción nacional de envases PET era de 625 toneladas, pero esta cantidad ha ido incrementándose en forma paulatina llegando hasta 59105 toneladas el año 2003, siendo la variación más

significativa la que se dio entre los años 1998 y 1999 debido al reemplazo de envases de vidrio principalmente en la industria de aguas y bebidas gaseosas. (P.54) El estudio de los materiales reciclados PET aplicados a la ingeniería ha permitido evaluar el amplio campo donde estos materiales tienen aplicación, principalmente como componentes estructurales de elementos constructivos. En geotécnica son pocas las experiencias en el uso de estos nuevos materiales. Su uso en estructuras de contención de suelos se presenta como una solución novedosa y ambientalmente positiva, que puede brindar en el futuro importantes beneficios en términos constructivos, como así también la durabilidad por ser los materiales PET más resistentes a la corrosión en comparación a los materiales de uso tradicional. (P.133) En cuanto a la interacción suelo-estructura, los resultados de los ensayos de rozamiento realizados muestran que, los distintos factores estudiados influyen de forma importante para la interacción entre materiales reciclados PET y suelos. De los factores analizados el contenido de humedad del relleno contenido, conjuntamente con el grado de compactación, presenta la mayor influencia en el ángulo de rozamiento δ . (P.133) Para el análisis de la estabilidad global, se empleó el software Slide Model (versión 5.033), el cual permite el cálculo de factor de seguridad, según los diferentes métodos aproximados y precisos definidos en el capítulo 4. Cabe mencionar que los resultados obtenidos en el talud de diseño N° 01 y N° 02 presentan valores aceptables en comparación de lo establecido ($F_s \geq 1.50$), asimismo el reporte de F.S son los más bajos de una familia de más de 13000 radios evaluados, esto muestra que se alcanza una estabilidad que garantiza su funcionamiento en las condiciones más críticas de operación. (P.134)

(Quispe Supo, 2014) afirma en la tesis “ESTABILIZACION DE SUELOS NO APTOS CON DESECHOS DE POLICLORURO DE VINILO PARA SU USO EN LA CONFORMACION DE LA CAPA BASE Y SUB BASE DE PAVIMENTOS”

La mayoría de los proyectos carreteros se imponen la utilización del suelo superficial disponible (suelo que se encuentra en el mismo lugar del proyecto) como materia prima fundamental en la construcción y/o se debe trabajar con materiales que no cumplen los requisitos mínimos de calidad de la especificación vial pertinente (Rodríguez, Rondón & Vélez, 2006) la mejora de este suelo mediante compactación y la incorporación de material granular o estabilizador, constituye una estrategia indispensable para lograr materiales adecuados a los requerimientos.(s/n) Por otro

lado, la utilización de este material, desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) como incorporación para la estabilización de suelos, aparte de mejorar la calidad del material de cantera, dándole un mayor durabilidad a la vía y al mismo tiempo prolongando la vida útil de los yacimientos de los materiales pétreos (material de río) o evitando la creación de nuevos, también traerá beneficios medioambientales, ahorro de energía (Cadenas Armentia, Romero Robles & Ainchil Lavin, 2008), reducir la demanda de recursos no renovables y una mejor gestión de residuos sólidos plásticos, para nuestra provincia de Pun- Distrito de Puno ya que, este material es altamente contaminante, no obstante, debido a tratarse de desechos es necesario que para su incorporación al suelos (material de cantera), se tome medidas de adoptar para su utilización. (P.4) El desecho de Policloruro de Vinilo como estabilizador de suelos si mejora las propiedades mecánicas del material de cantera, tomándolo apto para su uso en la conformación de la capa base y sub base de pavimentos. Ya que el desecho de Policloruro de Vinilo (PVC) tiene excelente rigidez, alta resistencia a la ruptura, resistencia química y considerando los resultados obtenidos de los ensayos de Abrasión, Proctor Modificado, Valor Relativo de Soporte y comparándolos con los requerimientos establecidos por la EG-2013, se llega a la conclusión que el porcentaje más eficiente de desecho de policloruro de vinilo (PVC), es el 6%. (Ref. Pág. 223, ítem 4.3.1.). De los diámetros de desecho de Policloruro de Vinilo que mejor se comporta para mejorar las propiedades mecánicas del material de cantera es el retenido por la malla N° 10 y la pasante la malla N° 4. (P.257) Ya que la disposición de desecho de Policloruro de Vinilo es limitada, se recomienda crear entidades y/o empresas que se dediquen exclusivamente al reciclado y estudio de desechos de Policloruro de vinilo (PVC), para que de esta forma se puedan tener cantidades que abastezcan los proyectos carreteros en nuestra Provincia de Puno-Distrito de Puno. También se sugiere que con las cantidades de desechos de Policloruro de vinilo que se tienen acumulados en la actualidad, se pueden realizar proyectos en tramos de prueba real, para evaluar el comportamiento funcional en esta zona, por ejemplo, en proyectos de pistas que a menudo se realizan en nuestro Distrito de Puno. (P.259).

(Sherwell Betancourt, 2014) afirma en la tesis “ESTUDIO DEL USO DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) COMO MATERIAL DE REFUERZO DE ESTRUCTURAS TÉRREAS CONFORMADAS POR SUELO FINO”

Las fibras pueden utilizarse para reforzar el suelo como inclusiones continuas previamente orientadas (geotextiles, geomallas, barras, etc.) tanto como inclusiones discretas orientadas aleatoriamente. (P.8) con fibras orientadas aleatoriamente y distribuidas en todo el volumen del suelo reforzado mediante un proceso de mezclado adecuado, no se deben de presentar planos de debilidad en el suelo reforzado. Lo cual redundaría en la estabilidad de la geo estructura a largo plazo y casi bajo cualquier condición de servicio de carga. (P.9) Gran parte de los desechos colectados en los rellenos sanitarios pueden reutilizarse pasando o no por el proceso de reciclado. Uno de ellos es el polietileno tereftalato, mejor conocido como PET. Dichos desechos, que pueden ser cualquier botella, envase y empaque de plástico utilizado en el mercado, si pasan por procesos específicos pueden reutilizarse y moldearse de tal forma que se obtengan fibras de los mismos desechos, donde las dimensiones de las fibras pueden ser las que el demandante requiera. (P.9) La reutilización de materiales, principalmente de desechos inorgánicos para la modificación de materiales de construcción, es un tema que actualmente ha alcanzado mucha fuerza debido al mejoramiento mutuo que existe en el rubro ambiental al reducir significativamente los desechos residuales, y a la vez mejorando el comportamiento mecánico de un material. (P.90) En el caso del polietileno tereftalato (PET), su demanda incrementa cada día, trayendo consigo mayor cantidad de este material como residuo inorgánico, teniendo actualmente un porcentaje de recuperación del 13%. Por lo que la industria del reciclado de dicha resina tiene bastante potencial de crecimiento en nuestro país. (P.90,91) La relación volumen/peso del PET, comparándolo con otros residuos, es alta, provocando una mayor velocidad de llenado en los rellenos sanitarios. Esto genera únicamente la necesidad de construir más rellenos, teniendo como problema que las áreas restantes para la construcción de éstas son muy reducidas. (P.91) En obras de construcción, el mezclado con fibras para el reforzamiento de un suelo, es únicamente viable cuando se realiza en una estructura terrea que cuente con suficiente espacio para realizar maniobras de movimiento de tierras y compactación. (P.92)

(Maheshwari K.V., 2011 citado en Sherwell,2014) menciona:

Realizaron a un suelo arcilloso altamente compresible reforzado con fibras de poliéster aleatoriamente distribuidas pruebas triaxiales y de consolidación a escala pequeña, al igual que en grandes muestras esforzadas por modelos de zapatas

cuadradas del laboratorio, con el fin de comparar los resultados con aquellos obtenidos de un suelo sin refuerzo. Se mezclaron fibras de 12mm de longitud con la arcilla en proporciones de 0 al 1%. Se registraron los resultados de la curva carga-asentamiento a diferentes profundidades para diferentes tamaños de zapatas cuadradas. Los resultados indicaron que el reforzamiento del suelo arcilloso altamente compresible causa un incremento en la última capacidad de carga y una disminución en los asentamientos en la última carga. (P.56)

(Olivier Plé y T.N.H. Lê., 2011 citado en Sherwell,2014) indica:

Para dar solución a los cuarteamientos que existen por las tensiones que provocan los asentamientos diferenciales en los rellenos sanitarios al utilizar la arcilla como capa esencial para la seguridad del sitio propusieron el reforzamiento de la arcilla por medio de fibras de polipropileno. Realizaron pruebas de compresión y tensión para la arcilla reforzada y no reforzada, dando como resultado que en la compresión el material compuesto se volvía cada vez más rígido con el incremento de fibras; por el contrario, en la tensión se observó que hubo un mejoramiento en la ductilidad del material compuesto, el cual puede mitigar el cuarteamiento. (P.56)

(Lopez Ortiz, 2013) afirma en la tesis “SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON MATERIALES DE PLÁSTICO RECICLADO (PET)”

Se ha encontrado que la industria de plástico en Colombia está en crecimiento y genera gran cantidad de residuos al año. Según Acoplásticos la cantidad de desechos oscilan entre las 220.000 y 280.000 toneladas al año (Acoplásticos, 2011). Para esta investigación se propone la reutilización de los desechos poliméricos para mejorar las propiedades mecánicas y físicas del suelo y reducir el impacto ambiental que éstos crean. A través de ensayos de laboratorio y la homogenización del suelo con fibras de plástico reciclado (PET), este proyecto presenta las ventajas que podría traer las fibras para el refuerzo de suelos arcillosos. (P.12) Un suelo en estado confinado puede resistir apropiadamente esfuerzos de compresión, pero al someterse a esfuerzo de tracción puede fallar fácilmente. La resistencia a corte de un suelo está condicionada por su cohesión y por la fricción interna de los granos, ningún suelo posee las propiedades para resistir esfuerzos a tracción, la fuerza de fricción interna del suelo podría ser incrementada agregando materiales de refuerzo. Se ha encontrado que el plástico es un

material resistente a esfuerzos de tracción por lo que sería un agregado favorable para complementar la resistencia en los suelos sometidos a tracción. (P.13) La cohesión como parámetro de medida a la resistencia al corte presenta un aumento en su valor, demostrando que las fibras de plástico reciclado pueden mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Es demostrado que a medida que la cantidad de porcentaje de fibra aumenta la resistencia del suelo también aumenta al igual que la deformación, por tal razón los esfuerzos a cortante son mayores y la ductilidad crece. Para la aplicación en proyectos de ingeniería se puede tener en cuenta que los suelos pueden ser reforzados con plástico reciclado, para mejorar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos. Porcentajes ideales entre 0.2 y 2.0%. Las mejoras en las propiedades del suelo se pueden observar más notablemente con las fibras de mayor longitud. Se observan mayores esfuerzos con fibras de longitud corta a mayor contenido de fibra, esto puede ser debido a que las longitudes largas con mayor contenido de fibra no se dejan moldear y se desmoronan fácilmente, generando poca adherencia entre las partículas del suelo. Con las fibras de mayor longitud se observa que la cohesión varía muy poco entre los porcentajes contenidos de fibra, mientras que en las de menor longitud la variación es notable con porcentajes más altos de fibra. Esto podría indicar que a menor longitud y mayor porcentaje puede existir una mejor homogenización de la mezcla generando mejor consistencia y mayores esfuerzos de resistencia. Al observar que la adición de fibra de plástico reciclado mejora las propiedades del suelo, también puede disminuir el impacto ambiental sacando provecho de los residuos de la industria del plástico. (P.67)

(Muñoz Perez, 2012) afirma en la tesis “ESTUDIO DEL USO DEL POLIETILENO TEREFALATO (PET) COMO MATERIAL DE RESTITUCIÓN EN SUELOS DE BAJA CAPACIDAD DE CARGA”

Reducir la demanda de botellas de PET es un paso esencial en la concientización de la reducción de los residuos. De acuerdo con un estudio del Environmental Products Inc (EPI), cada segundo se tiran a la basura 1,500 botellas de PET. La EPI demostró que aproximadamente 26 mil millones de litros embotellados equivalen a 17 millones de barriles de petróleo usados, la emisión de 2 millones de toneladas de gases de efecto invernadero a la atmósfera y 100 mil millones de dólares gastados, que servirían para que cada persona en el Planeta tuviera acceso al agua potable. (P.8) El problema radica

en que, según la ONU, cuatro de cada cinco botellas de PET utilizadas van directamente a los basureros. Esto significa que solamente el 20% del PET utilizado se recicla y esto es verdadero para países con alta conciencia ecológica como Alemania (19%). El problema está en países como el nuestro, donde se estima que se recicla del 7 al 9%. Y esto es para la sociedad que más consume líquido embotellado en el mundo. (P.8) Esta investigación se realiza en función de producir una innovación tecnológica que tienda a reemplazar las materias primas no renovables utilizadas en la ingeniería civil por otras más abundantes y que no tienen un destino final adecuado como son los materiales de desecho. Debido a la problemática existente, este trabajo pretende ser una opción viable en la reutilización de residuos, dando a los envases de PET un sitio de disposición final, siendo una alternativa más para ayudar a afrontar la situación actual. (P.9) El objetivo principal de este proyecto de investigación es la comprensión del comportamiento mecánico del Polietileno Tereftalato PET bajo esfuerzos de compresión estáticos, además de conocer la influencia que ejercen la densidad del material, la velocidad de desplazamiento y el confinamiento sobre dicho comportamiento. (P.10) (...) Se demostró que la densidad es importante en el valor de resistencia máxima de cada botella. Se observó que, para botellas del mismo tipo, aquellas que poseían un mayor gramaje (y por lo tanto una mayor densidad) presentaron una mayor resistencia. (P.115) Otro factor que mostró tener influencia en el comportamiento de los envases es la temperatura, aunque la deformación máxima que se tuvo por este concepto apenas alcanzó un valor de 0.25 milímetros, por lo que se podría despreciar en el Valle de México. Sería interesante estudiar el comportamiento en lugares con cambios de temperatura más intensos. (P.115) Las propiedades físicas del PET permiten utilizarlo como alternativa para la solución de diferentes problemas presentes dentro del campo de la Ingeniería Civil. Los resultados obtenidos mostraron que es factible el empleo de envases de PET para el mejoramiento de los suelos como relleno ligero, pero también podrían utilizarse para otras aplicaciones como pueden ser mampostería, rellenos de gaviones, como reemplazo parcial o total de taludes y como material de respaldo en estructuras de retención entre otros. (P.116)

2.2 EL SUELO

2.2.1. Definición de suelo y usos

Para propósitos de ingeniería, el suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se utiliza como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y con cimientos estructurales. Por lo tanto, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como el origen, la distribución de tamaño de grano, la capacidad de drenar el agua, compresión, resistencia al corte y la capacidad de soporte de carga. (M. Das, 2015)

2.2.2. La Mecánica de Suelos, la Ingeniería de Suelos y la Ingeniería Geotécnica

La mecánica de suelos es la aplicación de la ciencia física que se ocupa del estudio de las propiedades físicas del suelo y el comportamiento de las masas de suelos sometidos a diferentes tipos de fuerzas. La ingeniería de suelos es la aplicación de los principios de la mecánica de suelos a problemas prácticos. La ingeniería geotécnica es la rama de la ingeniería civil que enfoca su estudio en las propiedades mecánicas e hidráulicas de suelos y rocas, tanto en superficie como en el subsuelo, incluyendo la aplicación de los principios de la mecánica de suelos y mecánica de rocas en el diseño de los cimientos, estructuras de contención y las estructuras de tierra. (M. Das, 2015)

2.2.3. Clasificación 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. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada. En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata del American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. En Estados Unidos, el sistema AASHTO es utilizado principalmente por los departamentos de carreteras estatales y del condado, mientras que los ingenieros geotécnicos normalmente prefieren utilizar el Sistema Unificado. (M. Das, 2015)

2.2.3.1. Sistema de clasificación AASHTO

M. Das (2015) indica: El sistema de clasificación AASHTO utilizado actualmente se muestra en la tabla 4.1. De acuerdo con este sistema el suelo se clasifica en siete grupos principales: A-1 a A-7. Los suelos que clasifican en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz núm. 200. Los suelos donde más de 35% pasa a través del tamiz núm. 200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Éstos son principalmente limo y materiales del tipo de arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

1. Tamaño de grano

Grava: fracción que pasa el tamiz de 75 mm y es retenida en el tamiz núm. 10 (2 mm).

Arena: fracción que pasa el tamiz núm. 10 (2 mm) y es retenida en el tamiz núm. 200 (0.075 mm).

Limo y arcilla: fracción que pasa el tamiz núm. 200

2. Plasticidad: el término limoso se aplica cuando las fracciones finas del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones finas tienen un índice de plasticidad de 11 o más.

3. Si se encuentran cantos y guijarros (tamaño mayor a 75 mm), se excluyen de la porción de la muestra de suelo en el que se hizo la clasificación. Sin embargo, se registra el porcentaje de este tipo de material.

Para clasificar un suelo de acuerdo con la tabla 2.1, los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por proceso de eliminación, el primer grupo de la izquierda en la que quepan los datos de prueba es la clasificación correcta.

La figura 2.3 muestra un gráfico del rango del límite líquido y el índice de plasticidad de los suelos que se dividen en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7. Para la evaluación de la calidad de un suelo como un material de subrasante carretera, también se incorpora un número llamado índice de grupo (IG) a los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo.

El índice de grupo está dado por la siguiente ecuación:

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

Donde:

F =porcentaje pasado por el tamiz núm. 200

LL =límite líquido

PI =índice de plasticidad

El primer término de la ecuación, es decir (F - 35) [0.2 + 0.005(LL - 40)], es el índice de grupo parcial determinado por el límite líquido. El segundo término, 0.01 (F - 15) (PI - 10), es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad.

A continuación, se presentan algunas reglas para la determinación del índice de grupo:

1. Si la ecuación (4.1) da un valor negativo para IG, se toma como 0.
2. El índice de grupo calculado a partir de la ecuación (4.1) se redondea al número entero más próximo (por ejemplo, IG=3.4 se redondea a 3; IG=3.5 se redondea a 4).
3. No hay límite superior para el índice de grupo.
4. El índice de grupo de los suelos que pertenecen a los grupos A-1-a, A- 1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 siempre es 0.
5. Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, utilice el índice de grupo parcial para PI, o

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

En general, la calidad del rendimiento de un suelo como material de subrasante es inversamente proporcional al índice de grupo.

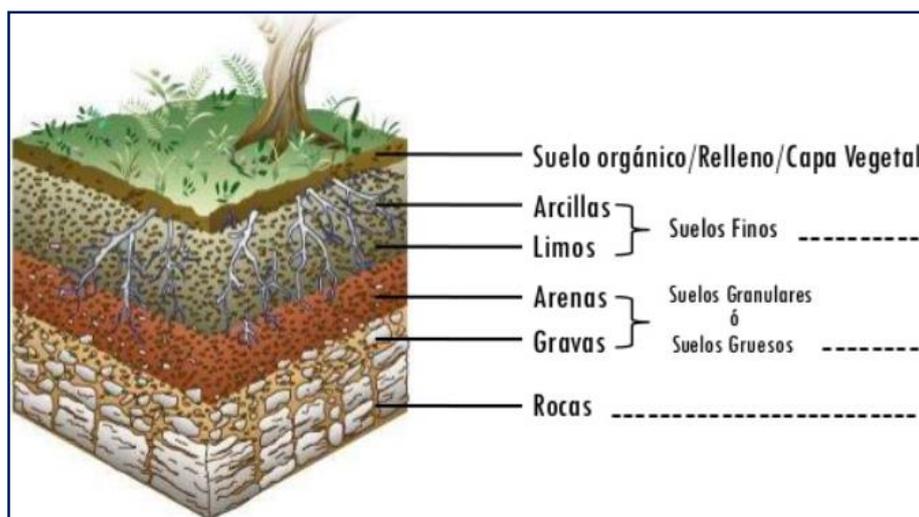


Figura 2.1: Esquema de distribución de tipos de suelo.

Fuente: (Stevenson, 2006)

2.2.3.1.1 Clasificación de suelos AASHTO (Ensayo de ASTM D 3282)

Práctica estándar recomendada para la clasificación de suelos y mezclas suelo-agregado para propósitos de construcción de carreteras (ASTM D 3282).

La norma americana ASTM D 3282 Indica lo siguiente: Esta práctica recomendada describe un procedimiento para clasificación de suelos minerales y orgánico-minerales en siete grupos, basado en la determinación en el laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el índice plástico. Puede ser utilizado cuando se requiere una clasificación precisa de ingeniería, especialmente para propósito de construcción de carreteras. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo es realizada por medio de un Índice de Grupo, el cual es un valor calculado de una fórmula empírica.

La clasificación de grupo, incluyendo el índice grupal, debe ser usado para determinar la calidad relativo del material de suelo para uso en estructuras de movimiento de tierras, particularmente terraplenes, explanadas, sub-bases, bases.

El parámetro “índice de grupo” es un indicativo de la calidad de la muestra, mientras más alto sea el valor, será menor la utilidad del suelo como material de subrasante.

INDICE DE GRUPO	SUELO DE SUBRASANTE
IG > 9	Muy Pobre
IG está entre 4 a 9	Pobre
IG está entre 2 a 4	Regular
IG está entre 1 a 2	Bueno
IG está entre 0 a 1	Muy Bueno

Figura 2.2: Calidad de subrasante según índice de grupo.

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de carreteras: Suelos, 2014)

Tabla 2.1: Clasificación de materiales de carreteras subrasantes

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes							
	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante				Excelente a bueno			

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo de clasificación				A-7 A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes				
	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante			Regular a malo	

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Fuente: Braja M. Das, “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, 2013.

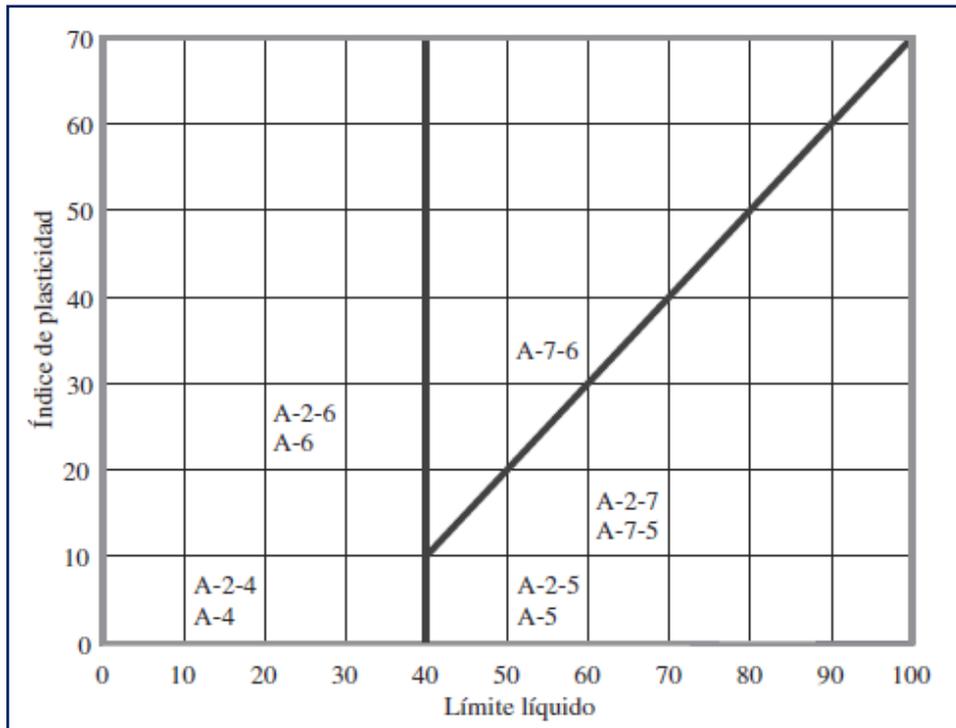


Figura 2.3: Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 Y A-7.

Fuente: Braja M. Das, “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, 2013.

2.2.3.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelo

M. Das (2015) indica: El Sistema Unificado de Clasificación se presenta en la tabla 2.2 y clasifica los suelos en dos grandes categorías:

1. Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural con menos de 50% que pasa a través del tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de G o S. G es para el suelo de grava o grava, y S para la arena o suelo arenoso.
2. Suelos de grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de M, que es sinónimo de limo inorgánico, C para la arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. El símbolo Pt se utiliza para la turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos que también se utilizan para la clasificación son:

- W: bien clasificado
- P: mal clasificado

- L: baja plasticidad (límite líquido menor de 50)
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor de 50)

Para la clasificación adecuada de acuerdo con este sistema, una parte o toda la siguiente información debe conocerse:

1. Porcentaje de grava, esto es, la fracción que pasa el tamiz de 76.2 mm y retenida en el tamiz núm. 4 (4.75 mm de apertura)
2. El porcentaje de arena, es decir, la fracción que pasa el tamiz núm. 4 (4.75 mm de apertura) y es retenida en el tamiz núm. 200 (0.075 mm de apertura)
3. El porcentaje de limo y arcilla, esto es, la fracción más fina que el tamiz núm. 200 (0.075 mm de apertura)
4. El coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de gradación (Cc)
5. El límite líquido y el índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa el tamiz núm. 40

Los símbolos de los grupos de los suelos de grava de grano grueso son GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM y GP-GC. Del mismo modo, los símbolos de los grupos de suelos de grano fino son CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML y Pt.

Los nombres de los grupos de los distintos suelos clasificados bajo el Sistema de Clasificación Unificado se pueden determinar usando las figuras 3, 4 y 5. Al usar estas figuras, hay que recordar que en un suelo dado:

- Fracción fina = % que pasa el tamiz núm. 200
- Fracción gruesa = % retenido en el tamiz núm. 200
- Fracción grava = % retenido en el tamiz núm. 4
- Fracción arena = (% retenido en el tamiz núm. 200) – (% retenido en el tamiz núm. 4)

Tabla 2.2: Sistema unificado de clasificación de suelo (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75)

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo	
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW	
		Menos de 5% finos ^a	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP	
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM	
		Más de 12% finos ^{a,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC	
	Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL
			Orgánico	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	ML
Limos y arcillas Límite líquido 50 o más		Inorgánico	Límite líquido: secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OL	OL	
		Orgánico	Límite líquido: no secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OH	OH	
Suelos altamente orgánicos Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico				Pt	

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 2, se usa doble símbolo CL-ML.

Fuente: Braja M. Das, "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", 2013.

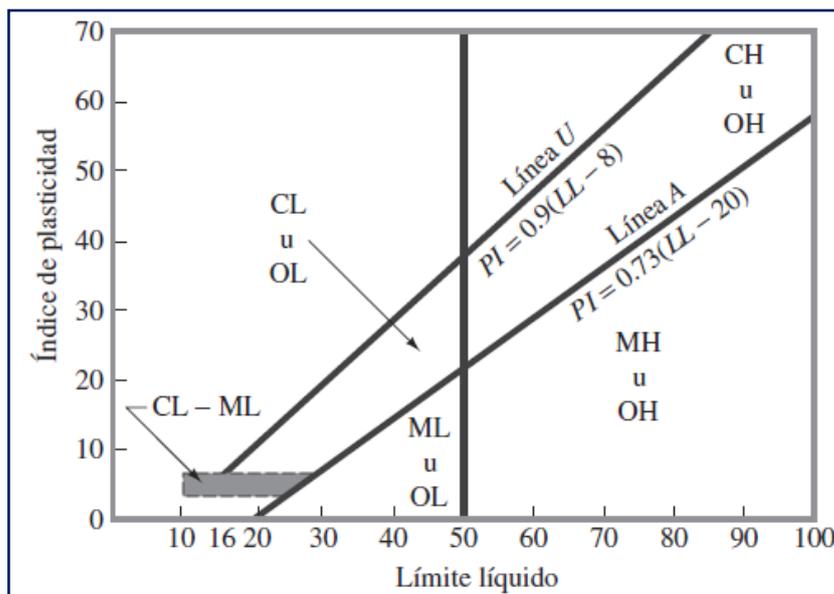


Figura 2.4: Grafica de Plasticidad

Fuente: Braja M. Das, "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", 2013.

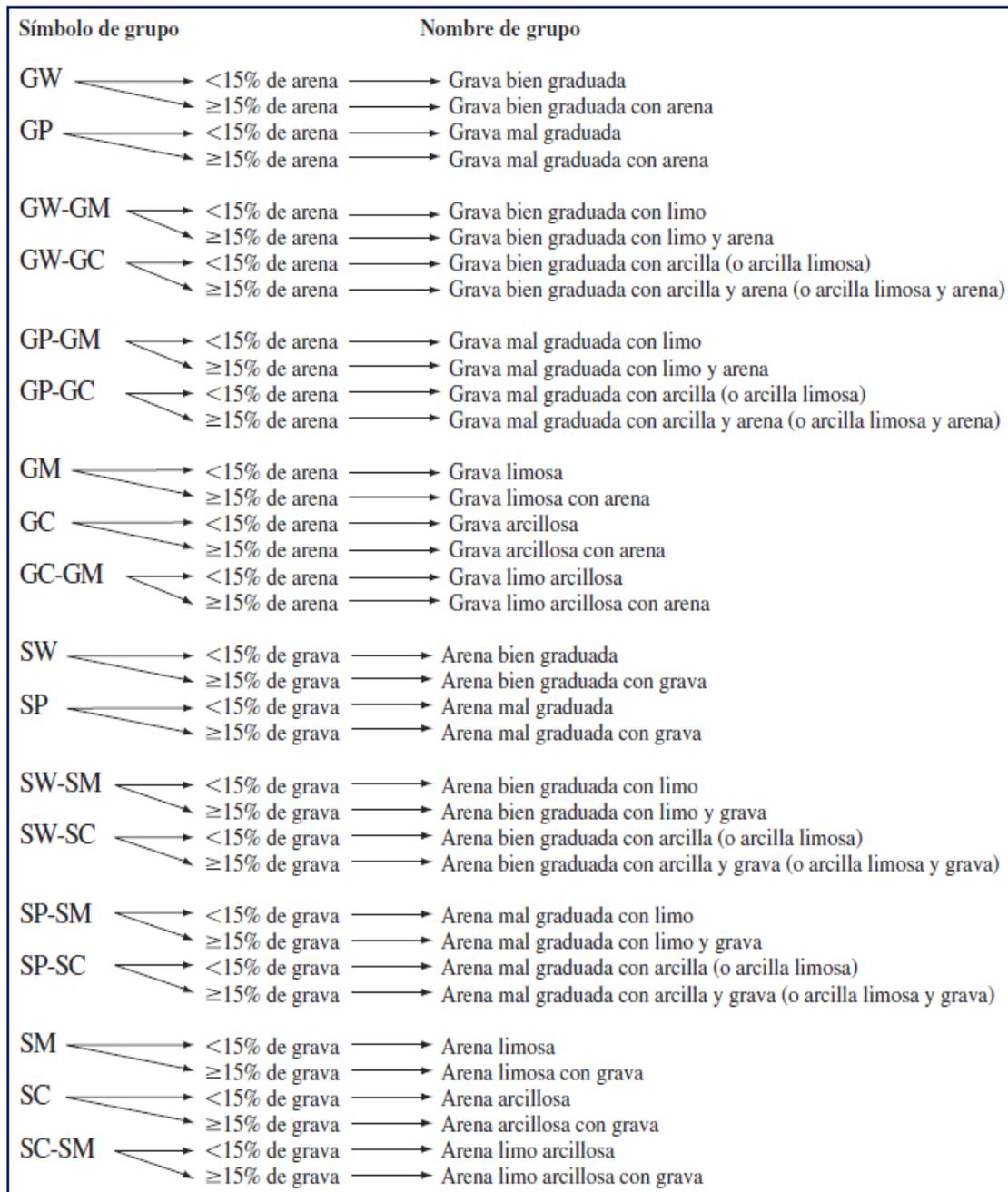


Figura 2.5: Diagrama de flujo para los nombres de los grupos de grava y arena del suelo

Fuente: Braja M. Das, “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, 2013.

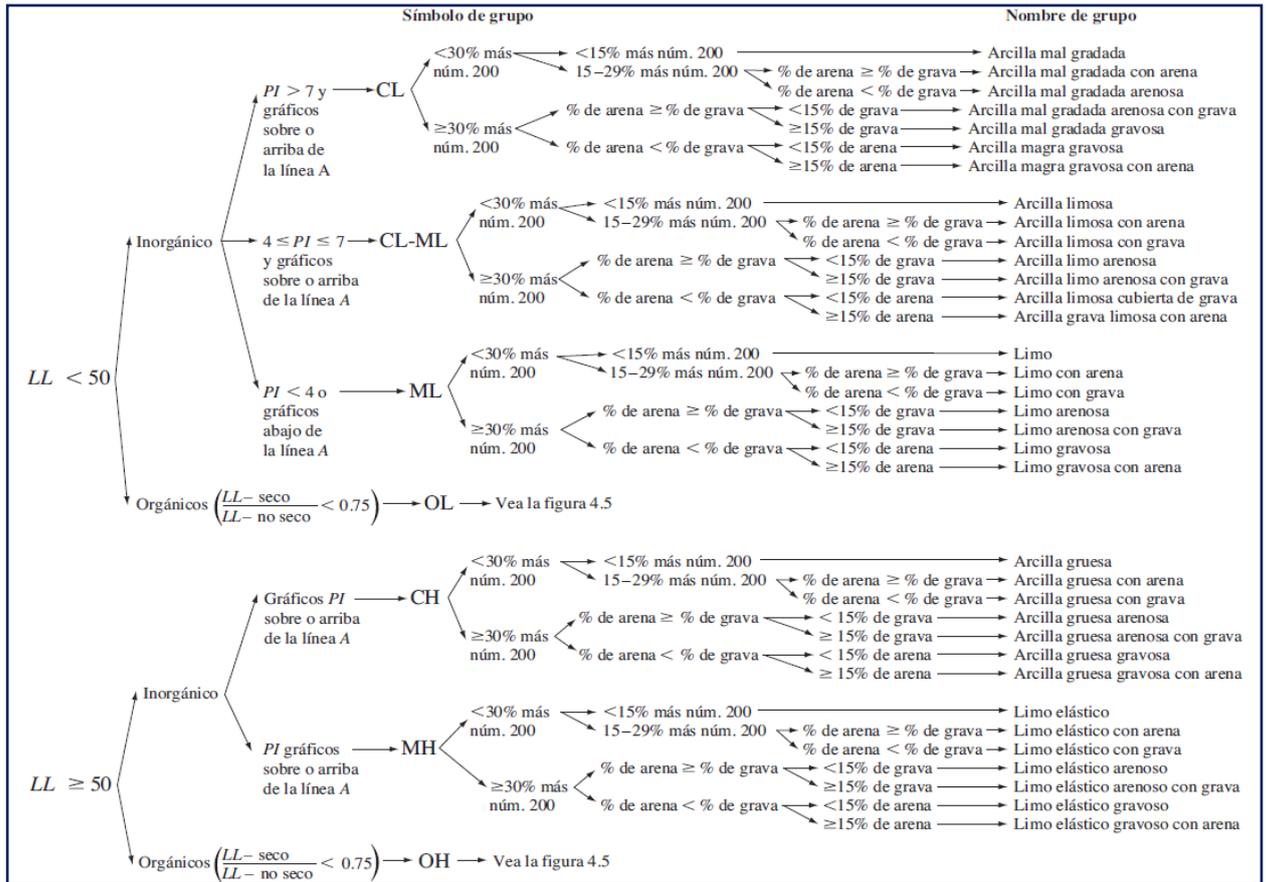


Figura 2.6: Diagrama de flujo de nombres de los grupos para limo inorgánico y suelos arcillosos.

Fuente: Braja M. Das, "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", 2013

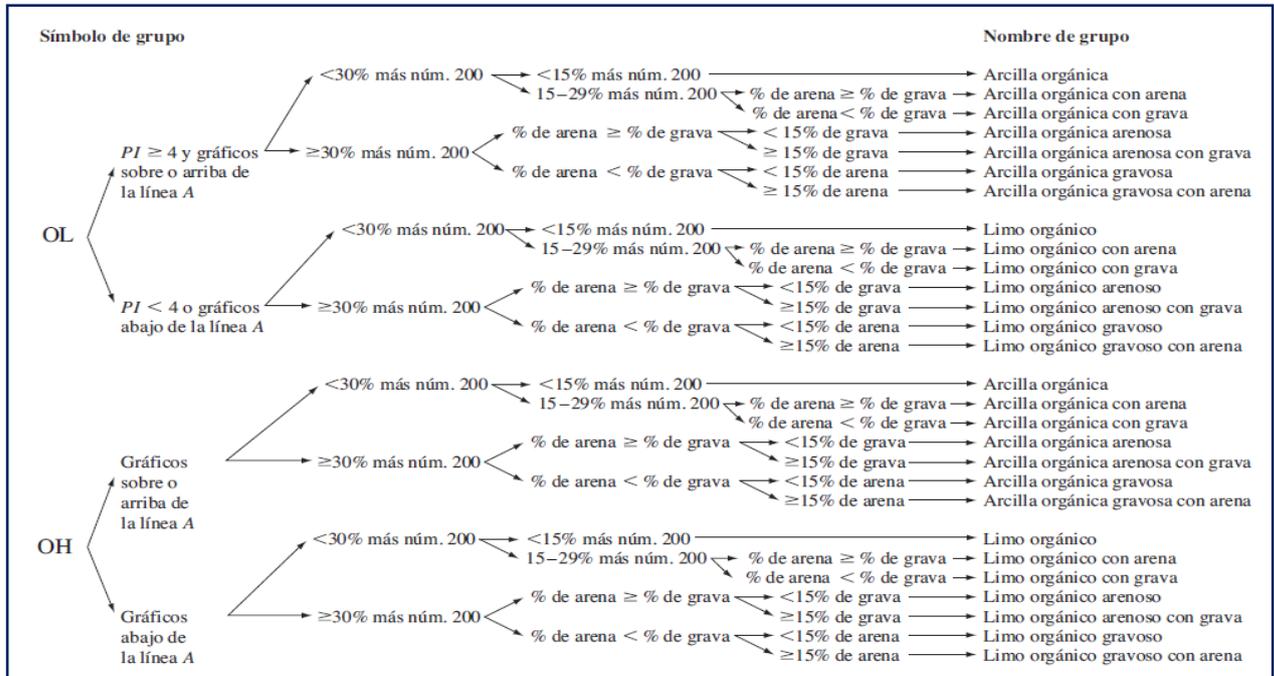


Figura 2.7: Diagrama de flujo de nombres de los grupos para limoso orgánico y suelos arcillosos.

Fuente: Braja M. Das, "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", 2013

2.3 PAVIMENTOS, CONSTITUCIÓN Y CONCEPTOS GENERALES

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (Montejo Fonseca, 2002).

2.3.1 Características que debe reunir un pavimento

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito. (Montejo Fonseca, 2002)

2.3.2 Funciones de la estructura de Pavimentos

- Proporcionar a los usuarios circulación segura, cómoda y confortable sin demoras excesivas.
- Proporcionar a los vehículos acceso bajo cualquier condición de clima.

- Reducir y distribuir la carga de tráfico para que ésta no dañe la subrasante.
- Cumplir requerimientos medio ambientales y estéticos.
- Limitar el ruido y la contaminación del aire. (Menéndez Acurio, 2009)

2.3.3 Tipos de pavimentos

(Menéndez Acurio, 2009) Se tienen principalmente los siguientes tipos de pavimentos:

- Pavimentos flexibles
 - Convencionales
 - Profundidad total (full Depth)
- Pavimentos rígidos
 - Simple o monolítico
 - Simple con dovelas o barras de transferencia
 - Con refuerzo continuo sin función estructural
 - Con refuerzo estructural
 - Preesforzado
- Pavimentos compuestos
 - Pavimento flexible con refuerzo de pavimento rígido
 - Pavimento rígido con refuerzo de pavimento flexible
- Pavimentos semirígidos
 - Adoquinados
 - Emboquillados
- Pavimentos afirmados
- Vías no pavimentadas

2.3.3.1 Pavimentos flexibles

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra. (Montejo Fonseca, 2002)

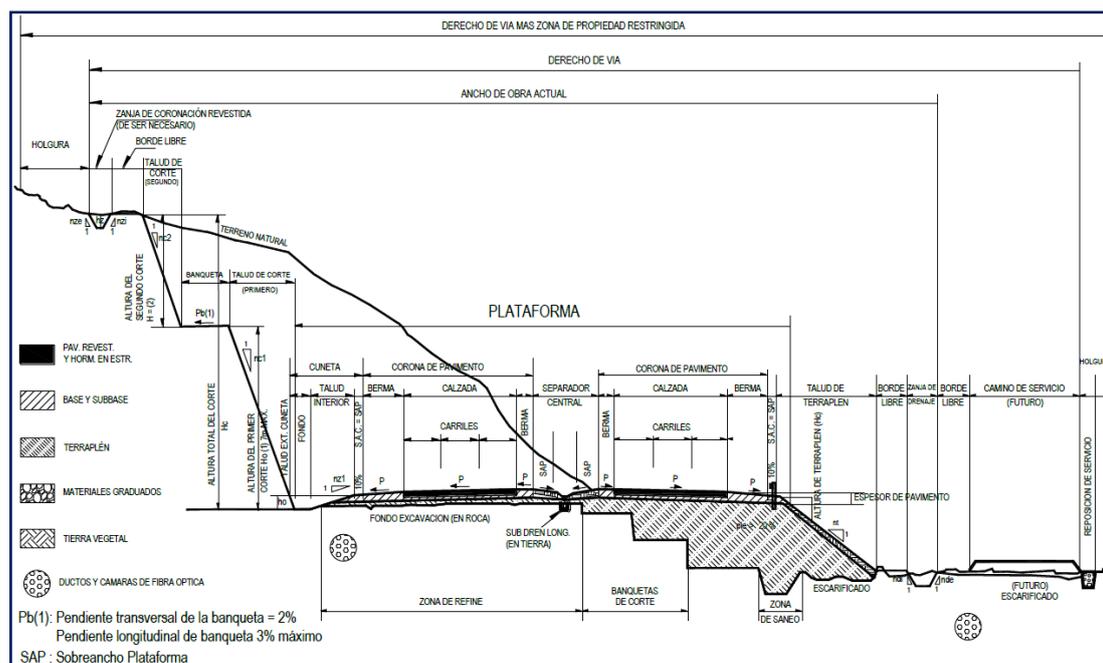


Figura 2.8: Sección transversal tipo a media ladera para una autopista en tangente

Fuente: (Ministerio de Transporte y Comunicaciones DG 2018, 2018)

2.3.4 Factores de diseño de pavimentos

(Menéndez Acurio, 2009) Los principales factores de diseño son:

- Tráfico y carga
 - Carga por eje
 - Número de repeticiones
 - Área de contacto
 - Presión de contacto
 - Velocidad de vehículo
- Medio ambiente
 - Temperatura
 - Precipitación
 - Radiación solar
- Materiales
 - Mejoramientos
 - Bases y subbases granulares
 - Materiales estabilizados
 - Carpeta asfáltica
 - Losa de concreto

- Criterios de falla
 - Fisuras por fatiga
 - Ahuellamiento
 - Fisuras por gradiente térmico
 - Erosión o bombeo

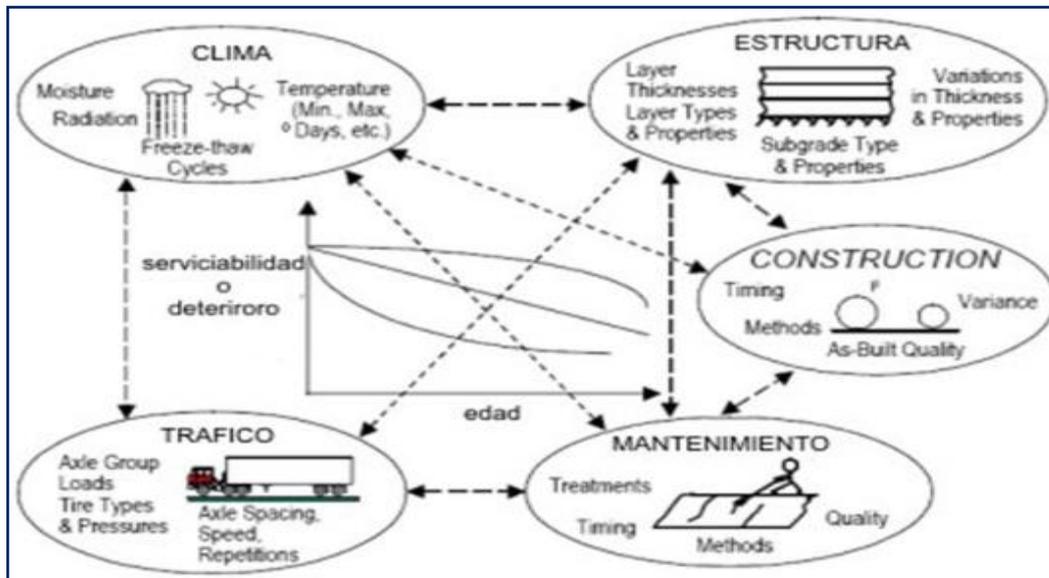


Figura 2.9: Factores de diseño de pavimentos

Fuente: (Menéndez Acurio, 2009)

2.3.5 Componentes de la infraestructura del camino

2.3.5.1 Terraplén

El terraplén es la parte de la explanación situada sobre el terreno preparado. También se conoce como relleno. La base y cuerpo del terraplén o relleno será conformado en capas de hasta 0.30 m y compactadas al 90% de la máxima densidad seca del ensayo próctor modificado. La corona es la parte superior del terraplén tendrá un espesor mínimo de 0.30m y será conformada en capas de 0.15m, compactadas al 95% de la máxima densidad seca del ensayo próctor modificado. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de carreteras: Suelos, 2014)

2.3.5.1.1 Subrasante del camino

La Subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado. La subrasante es el asiento directo de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la carretera que se construye entre el terreno natural allanado o

explanada y la estructura del pavimento. La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito. Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento que se colocará encima. En la etapa constructiva, los últimos 0.30m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo Proctor modificado (MTC EM 115).

Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados y estables con $CBR \geq 6\%$. En caso el suelo, debajo del nivel superior de la subrasante, tenga un $CBR < 6\%$ (subrasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para lo cual el Ingeniero Responsable analizará según la naturaleza del suelo alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilización química de suelos, estabilización con geosintéticos, elevación de la rasante, cambiar el trazo vial, eligiéndose la más conveniente técnica y económica. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de carreteras: Suelos, 2014)

2.3.5.2 Sub Base Granular

Capa de materiales pétreos, cuyas funciones principales son: proporcionar un apoyo uniforme a la base de una carpeta asfáltica o una losa de concreto hidráulico, soportar las cargas que estas transmiten aminorando los esfuerzos inducidos y distribuyéndolos adecuadamente a la capa inmediatamente inferior; otra característica es que previene la migración de finos hacia las capas superiores. (Mendoza Mendiola & Guadarrama Ramos, 2008)

2.3.5.2.1 Funciones de la sub base granular

Como la calidad es inferior al de la Base (En cuanto al CBR, Abrasión, Índice de Plasticidad), la Capa Sub Base tiene también un efecto en la economía de la obra; ya que nos ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de Base a un espesor equivalente de material Sub Base, sin embargo, esta capa no necesariamente

se considera en todos los diseños de un pavimento flexible, sino más bien sólo en aquella cuya estructura es grande por la importancia de la obra. “La capa Sub Base también impide que el agua de las terracerías (volúmenes de materiales que se extraen o que sirven de relleno en la construcción de una vía terrestre) ascienda por capilaridad y evita que el pavimento sea absorbido por la Sub Rasante. También deberá transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías” (Mendoza Mendiola & Guadarrama Ramos, 2008)

2.3.5.3 Base Granular

“Capa de material pétreo seleccionado que se construye generalmente sobre la Sub Base, cuyas funciones principales son: proporcionar un apoyo uniforme a la carpeta asfáltica, soportar las cargas que, esta trasmite aminorando los esfuerzos inducidos y distribuyéndolos adecuadamente a la capa inmediatamente inferior, proporcionar a la estructura de pavimento rigidez necesaria para evitar deformaciones excesivas, drenar el agua que se pueda infiltrar e impedir el ascenso capilar del agua” (Mendoza Mendiola & Guadarrama Ramos, 2008)

Es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. Regularmente esta capa además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para poder resistir las cargas del tránsito sin deformarse y además de transmitirlas en forma adecuada a las capas inferiores. El valor cementante (Valor Relativo de Soporte) en una Base es indispensable para proporcionar una sustentación adecuada a las carpetas asfálticas delgadas. En caso contrario, cuando las Bases se construyen con suelos inertes y se comienza a transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales y longitudinales. “En el caso de la granulometría, no es estrictamente necesario que los granos tengan una forma semejante a la que marcan las fronteras de las zonas, siendo de mayor importancia que el material tenga un Valor Relativo de Soporte (CBR) y una plasticidad mínima” (Mendoza Mendiola & Guadarrama Ramos, 2008) (Ortega Quiroz, 2008)

2.3.6 Esfuerzos y deformación en la estructura del pavimento ocasionado por los vehículos.

El vehículo es el nexo entre el conductor que lo maneja y la vía que lo soporta, por lo que el estudio de sus características y comportamiento es fundamental. Los vehículos que se fabrican en la actualidad están destinados a distintos usos, por lo que sus características varían dentro de una amplia gama de formas, tamaños y pesos. (Nuñez Condori, 2016)

2.3.6.1 Peso vehículo y su transmisión de carga.

La carga de vehículos pesados, en especial el eje estándar, conforme a la concepción de la AASHTO 93, se define como aquel constituido por un arreglo de ruedas sencillas (dos llantas adosadas en cada extremo), que transmite a la superficie del pavimento una descarga total de 8.2 ton (18,000 lbs), cuando la presión de inflado de sus neumáticos es de aprox. 5.8 kg/cm² (577 kpa). (Ver figura 2.9) (Lizárraga López, 2013) Citado en (Nuñez Condori, 2016)

El factor de equivalencia de carga (FEC), se define como el daño ocasionado sobre el pavimento, en cuestión de relación a los daños causados por la carga de eje estándar. Asimismo, con el propósito de homologar las cargas y presiones de inflado, el tránsito real en una determinada carretera se ha constituido por diversos tipos de vehículos con diferentes arreglos en sus ruedas. La magnitud y distribución del peso del vehículo, así como de la carga que transporta, determina junto con las características mecánicas de los neumáticos, la forma de transmisión de la totalidad de las cargas a la base. Ahora resaltaremos algunos ítems importantes para un mejor estudio y entendimiento. (Nuñez Condori, 2016)

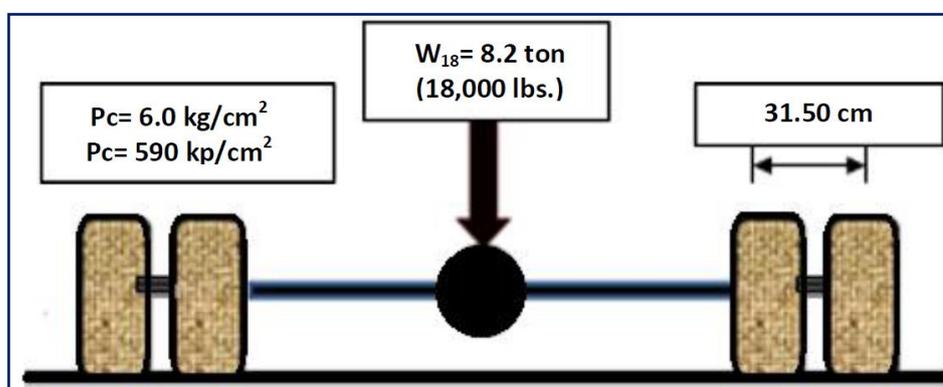


Figura 2.10: Parámetros de caracterización de carga de la AASHTO 93

Fuente: (Lizárraga López, 2013)

- El aplastamiento del neumático es proporcional a la carga. Esta relación aplastamiento/carga se denomina rigidez del neumático, y su valor medio para neumáticos de baja presión es de 5 mm. por cada 100 kg. (ver figura 2.10.)

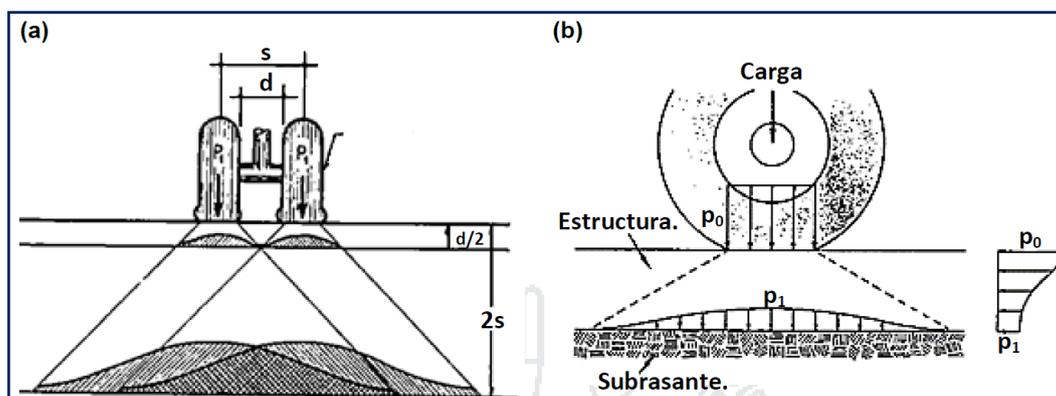


Figura 2.11: Comportamiento y respuestas del pavimento frente a cargas. (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

Fuente: FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES, 2010 citado en (Nuñez Condori, 2016).

- El neumático, debido a la deformabilidad del caucho, provoca esfuerzos de cizalladura; éstos son las responsables del desgaste de los neumáticos en las calzadas, además son generadores de ruido.
- Para una misma carga, las distintas presiones de inflado suponen un reparto diferente de las tensiones a lo largo de la superficie de contacto.
- La presión media aplicada sobre la calzada es constante y sensiblemente igual a la presión de inflado del neumático. Esto no es del todo cierto, aunque puede aplicarse esta simplificación para el cálculo de bases.

Por lo tanto, una mayor carga de proyecto exigirá un mayor espesor de la capa de base para distribuir correctamente los esfuerzos. De esta afirmación se deduce que:

- El vehículo ligero no ejerce solicitaciones importantes en la base.
- El vehículo pesado es el que somete a la carretera a mayores tensiones.

En los métodos de diseño, necesario conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento, el tamaño del área de contacto depende de la presión de contacto, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta para presiones bajas de la llanta, ver

figura 2.11(a), debido que la pared de la misma está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión de la llanta deben ser iguales.

Fuerza debido a la presión de contacto; la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta para presiones altas de las llantas, ver figura 2.11(b), debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, en el diseño de pavimentos la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta, debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, al utilizar la presión de llanta como presión de contacto es estar por el lado de la seguridad. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)



Figura 2.12: Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta. (a) Baja presión; (b) Alta presión.

Fuente: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Cabe describir que dichas solicitaciones no crecen proporcionalmente a la carga aplicada, sino que lo hacen exponencialmente, debido a las características mecánicas del material que constituye la base. Una consecuencia inmediata es el rápido acortamiento de la vida útil de la carretera en el caso de que circulen vehículos con cargas por eje superiores a las fijadas. Otro aspecto desfavorable es el continuo proceso de carga y descarga producido por el paso de vehículos, que produce la fatiga del material que conforma la calzada, acelerando el deterioro de la base. Otro punto importante, debemos tener en cuenta los pesos máximos por eje independiente o grupos de ejes permitidos a los vehículos para su circulación por las vías de nuestro país. (Nuñez Condori, 2016)

2.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos.

En cambio, cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como subbase o base granular tratada (con cemento o con cal o con asfalto, etc).

La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición 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. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de carreteras: Suelos, 2014)

2.4.1 Criterios geotécnicos para establecer la estabilización de suelos

Según el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de carreteras: Suelos, 2014) existen ciertos criterios para establecer suelos los cuales son:

- Se considerarán como materiales aptos para las capas de la subrasante suelos con CBR $\geq 6\%$. En caso de ser menor (subrasante pobre o subrasante inadecuada), o se presenten zonas húmedas locales o áreas blandas, será materia de un Estudio Especial para la estabilización, mejoramiento o reemplazo, donde el Ingeniero Responsable analizará diversas alternativas de estabilización o de solución, como: Estabilización mecánica, Reemplazo del suelo de cimentación, Estabilización con productos o aditivos que mejoran las propiedades del suelo, Estabilización con geosintéticos (geotextiles, geomallas u otros), Pedraplenes, Capas de arena, Elevar la rasante o cambiar el trazo vial sí las alternativas analizadas resultan ser demasiado costosas y complejas.
- Cuando la capa de subrasante sea arcillosa o limosa y, al humedecerse, partículas de estos materiales puedan penetrar en las capas granulares del pavimento

contaminándolas, deberá proyectarse una capa de material anticontaminante de 10 cm. de espesor como mínimo o un geotextil, según lo justifique el Ingeniero Responsable.

- La superficie de la subrasante debe quedar encima del nivel de la napa freática como mínimo a 0.60 m cuando se trate de una subrasante extraordinaria y muy buena; a 0.80 m cuando se trate de una subrasante buena y regular; a 1.00 m cuando se trate de una subrasante pobre y, a 1.20 m cuando se trate de una subrasante inadecuada. En caso necesario, se colocarán subdrenes o capas anticontaminantes y/o drenantes o se elevará la rasante hasta el nivel necesario.
- En zonas sobre los 4,000 msnm, se evaluará la acción de las heladas en los suelos. En general, la acción de congelamiento está asociada con la profundidad de la napa freática y la susceptibilidad del suelo al congelamiento. Sí la profundidad de la napa freática es mayor a la indicada anteriormente (1.20 m), la acción de congelamiento no llegará a la capa superior de la subrasante. En el caso de presentarse en la capa superior de la subrasante (últimos 0.60 m) suelos susceptibles al congelamiento, se reemplazará este suelo en el espesor comprometido o se levantará la rasante con un relleno granular adecuado, hasta el nivel necesario. Son suelos susceptibles al congelamiento, los suelos limosos. Igualmente, los suelos que contienen más del 3% de su peso de un material de tamaño inferior a 0.02 mm, con excepción de las arenas finas uniformes que aunque contienen hasta el 10% de materiales de tamaño inferior a los 0.02mm, no son susceptibles al congelamiento. En general, son suelos no susceptibles los que contienen menos del 3% de su peso de un material de tamaño inferior a 0.02 mm.
- Para establecer un tipo de estabilización de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que predominantemente se encuentran en este ámbito son: los limos, las arcillas, o las arenas limosas o arcillosas.
- Los factores que se considerarán al seleccionar el método más conveniente de estabilización son:
 - a. Tipo de suelo a estabilizar
 - b. Uso propuesto del suelo estabilizado

- c. Tipo de aditivo estabilizador de suelos
- d. Experiencia en el tipo de estabilización que se aplicará
- e. Disponibilidad del tipo de aditivo estabilizador
- f. Disponibilidad del equipo adecuado
- g. Costos comparativos

2.4.2 Métodos para el mejoramiento de suelos

Día a día se crean nuevos métodos para el mejoramiento de suelo, y sus aplicaciones evolucionan constantemente. Sin embargo, de acuerdo a diferentes autores relacionados (Terashi M., Juran I., Munfakh G.A., Wyllie D.C.), los principales métodos utilizados en el estado actual de práctica se clasifican en 8 categorías basadas en sus principios. A continuación, se hace una breve descripción de cada uno. (Sherwell Betancourt, 2014)

2.4.2.1 Reemplazo

Es la técnica más simple en concepto y segura si se emplea adecuadamente. Se remueve el suelo blando debajo o cerca de la estructura y se reemplaza por algún suelo foráneo de calidad óptima con un peso menor o igual para mantener la estabilidad o evitar asentamientos de una estructura. Inicialmente se prefería grava y arena porque, aunque fuera suelo granular suelto, tenían un mejor comportamiento que los suelos blandos, orgánicos, limosos y/o arcillosos. Sin embargo, la arena suelta saturada puede causar serios problemas a la estructura en regiones sísmicas. Aunque sea el método más sencillo, su problema radica en la escasez de materiales granulares de buena calidad y en la preocupación de problemas sísmicos en la zona.

2.4.2.2 Densificación

Es una práctica común la densificación de suelos granulares sueltos, suelos heterogéneos, residuos municipales y de suelos licuables. El propósito de densificar un suelo es para aumentar su resistencia y reducir los asentamientos posibles. La tecnología precursora de esta categoría son los pilotes cortos de madera que se hincan en la capa de arena suelta. La densificación en la superficie se puede obtener por rodillos convencionales, pero a mayores profundidades técnicas bien establecidas logran la densificación, como:

- Vibrocompactación: el suelo granular suelto se densifica por medio de barras vibratoras insertadas en el depósito hasta una profundidad de 30 m. La compactación se obtiene por el impacto y la vibración, que puede ser con o sin aire comprimido y la adición de material granular.
- Compactación dinámica: gran cantidad de peso se deja caer usualmente de una altura entre 12 m y 24 m formando cráteres en el suelo que en conjunto crean la forma de una rejilla. La gran cantidad de energía liberada contra el suelo hace que se densifique el suelo hasta una profundidad de 3 m a 8 m. Finalmente los cráteres formados, algunas veces se rellenan con material granular.
- Compactación por voladura: se entierran explosivos en el suelo suelto y se hacen detonar. Las ondas de choque generadas por la voladura, rompe la estructura inicial del suelo creando una condición de licuación que permite el reacomodo de las partículas en un estado más denso. Por este método se tienen varios puntos clave que pueden afectar en la efectividad de la densificación: (a) porcentaje de finos en el suelo, (b) capacidad del suelo para disipar la presión de poro en exceso, (c) la energía absorbida por el suelo, (d) la presencia de cantos rodados y estructuras adyacentes, y (e) el fenómeno de la meteorización.

2.4.2.3 Consolidación

Cuando una cimentación está en contacto con un suelo cohesivo con poca resistencia y baja permeabilidad, esta estructura podrá experimentar problemas de estabilidad y en largos periodos asentamientos desfavorables. La carga sobre la capa crea un esfuerzo total que es sostenida por la presión de poro, la cual con el tiempo se disipará creando una disminución en el volumen del suelo y a la vez un aumento en el esfuerzo efectivo y en su resistencia; eso es la consolidación.

Desafortunadamente, esta mejora se acompaña por la disminución del volumen y deformación del suelo. Para mitigar estos impactos en la estructura, el suelo a menudo se preconsolida bajo cargas mayores a las de diseño, de modo que las deformaciones tengan lugar antes de la construcción de la estructura.

Básicamente hay tres métodos del mejoramiento de suelo por consolidación:

- Precarga con o sin drenes verticales: la colocación de terraplenes es la técnica más antigua que entra en esta categoría para mejorar los suelos cohesivos. Cuando el grosor de dicho suelo es grande (aumenta el camino de drenado), el tiempo de consolidación es inaceptable, por ello se busca acelerar el tiempo de drenado por medio de drenajes verticales ya sean artificiales o por medios de suelo granular. Sin embargo, hay lugares donde no se cuentan con recursos, tiempo ni espacio para aplicar una precarga al terreno e incrementar su esfuerzo efectivo.
- Electro-ósmosis: en muchos aspectos es lo mismo que la consolidación bajo tensiones aplicadas externamente, excepto que la fuerza motriz del drenado es inducida internamente por un campo eléctrico.
- Consolidación por vacío: en esta técnica se crean presiones negativas en la superficie del suelo ayudado por un sistema de drenajes verticales y horizontales, provocando la extracción de líquidos y gases dentro del suelo (Munfakh, 1999). Para lograr succión, una membrana hermética se coloca en la superficie y en la periferia del terreno.

2.4.2.4 Tratamiento químico

Es una técnica que consiste en mezclar aditivos con el suelo para mejorar la consistencia, resistencia, características de deformación y la permeabilidad del suelo. Esta mejora es posible por el intercambio de iones en los minerales de la arcilla creada por reacciones de productos químicos, uniendo las partículas del suelo. Debido a su disposición y su costo relativamente bajo, los aditivos más utilizados son cal y cemento. En la superficie a estabilizar, los químicos son mezclados con el suelo y agua en cantidades apropiadas, luego se compactan utilizando equipos y procedimientos convencionales.

2.4.2.5 Estabilización térmica (calentamiento y congelamiento)

Aún a temperaturas ordinarias bajo el sol, los suelos finos son mejorados por desecación. La costra seca formada en la superficie de los lodos es un ejemplo de ello. Naturalmente el calentamiento artificial es más efectivo. Una técnica in situ para vitrificar

el suelo es por medio de corrientes eléctricas causando temperaturas extremas (1600~2000°C). Se logra por medio de electrodos de grafito utilizados para conducir la electricidad por el suelo. El suelo derretido se vuelve conductor de electricidad sirviendo como medio para la transferencia de calor. Esta técnica es efectiva para suelos contaminados por compuestos orgánicos, inorgánicos y radioactivos.

En el caso de congelamiento la resistencia de un suelo depende de diferentes factores como el tipo de suelo, contenido de agua y velocidad de congelación. Dos sistemas básicos son usualmente utilizados en el congelamiento: un sistema abierto donde el refrigerante (nitrógeno líquido o dióxido de carbono) se pierde en la atmósfera después de absorber energía, o un sistema hidráulico de circuito cerrado utilizando una planta mecánica convencional y un refrigerante circulante. El suelo congelado se acerca a ser un material impermeable. Esta técnica se usa para incrementos temporales de resistencia y cierres de filtraciones de agua a cielo abierto, excavación de ejes y tunelajes. El congelamiento ha ido recibiendo gran aceptación como medida temporal de excavaciones en áreas urbanas.

2.4.2.6 Reforzamiento

Consiste en crear un sistema de suelo reforzado in situ por medio de inclusiones en direcciones predeterminadas para mejorar las características de resistencia a corte y capacidad de carga de un suelo existente. Las tecnologías de reforzamiento de suelo tienen un aumento constante de diferentes técnicas de instalación y de materiales de refuerzo que, dependiendo de la aplicación ingenieril, se diseñan para resistir las fuerzas requeridas (tensión, compresión, flexión o sus combinaciones) por encima de la vida útil de la estructura. El reforzamiento de un suelo usualmente se logra por los siguientes métodos:

- Estabilización mecánica: los elementos de refuerzo se colocan entre capas de suelo compactado. Diferentes materiales (metales, polímeros, geotextiles, geomallas, etc.) y formas (tiras, redes, láminas, barras, etc.) son usadas como reforzamiento. Un ejemplo de esta técnica es la tierra armada, utilizada para retener muros o taludes de terraplenes. Es importante resaltar que la resistencia al corte en la superficie de la inclusión en contacto con el suelo disminuye en

comparación con el contacto suelo, por lo que es muy probable que una falla ocurra en la interfaz del suelo y la inclusión plana.

- Clavado de suelo: este concepto trata en colocar elementos de refuerzo con espacios estrechos entre sí para incrementar la resistencia al corte del suelo y restringir sus desplazamientos durante y después de una excavación. Esta técnica se realiza mediante un proceso de arriba hacia abajo, que consta de tres etapas repetitivas: (1) excavación hasta una profundidad límite, (2) instalación de los clavos (por conducción, perforación, etc.) y drenaje, y (3) colocación de un revestimiento.
- Anclaje del suelo: se instalan anclas postensadas para reforzar el suelo y ayudar, similarmente al clavado de suelo, con las excavaciones. Las anclas se ligan con elementos o paneles en la superficie.
- Micropilas: son pequeñas pilas, generalmente con diámetros menores a 300 mm, que se hincan verticalmente y con distancias entre ellas más estrechas que una pila convencional para ayudar en la estabilidad del suelo en excavaciones, pendientes o cimentaciones. El complejo del suelo-micropila es análogo al concreto reforzado.
- Columnas de piedra: implica el reemplazo del 10% al 35% del suelo blando por columnas de piedra y a veces de arena (Welsh, Joseph P., 1987). Se aplican a suelos blandos cohesivos para aumentar su capacidad de carga, reducir los asentamientos acelerando su consolidación, mejorar la estabilidad en pendientes y controlar el potencial de licuación. Se pueden construir utilizando el mismo equipo que en la vibro compactación. La presencia de columnas de piedra transforma al suelo en una masa compuesta de cilindros granulares con la intervención del suelo nativo, mejorando las características del suelo nativo solo.

Los problemas clave que afectan al reforzamiento de suelo son: (a) la transferencia de carga a los elementos de refuerzo, (b) la superficie de falla, (c) la compatibilidad de tensión entre el suelo y el material de refuerzo, (d) el acomodo de los elementos de

refuerzo, y (e) la durabilidad y comportamiento a largo plazo del refuerzo. Mientras que una gran variedad de preguntas no se ha resuelto, se cree que las técnicas de reforzamiento del suelo usadas actualmente, han madurado, se han vuelto seguras y de costo accesible en sitios y condiciones del suelo difíciles en la ingeniería geotécnica.

2.4.2.7 Electro-tratamiento

Actualmente se aplica para remediar suelos contaminados, el método de electro tratamiento aplica corrientes eléctricas al suelo para remover contaminantes en una forma discreta en lugares tanto con excavaciones y transportes limitados con un mínimo impacto ambiental. Métodos utilizados en la geo tecnología ambiental son:

- **Remediación electrocinética:** se usa principalmente para la extracción de iones contaminantes como metales pesados, y secundariamente para la remoción de compuestos volátiles y semivolátiles. Siguiendo el principio de la electroósmosis desarrollada para la deshidratación de suelos arcillosos, la remediación electrocinética utiliza una corriente eléctrica aplicada a través de una masa de suelo por un conjunto de electrodos colocados en el suelo por medio de perforaciones. Bajo la influencia del campo eléctrico, los iones se separan de las partículas del suelo y se transportan electro cinéticamente a sus respectivos nodos (cationes hacia cátodo, aniones hacia el ánodo) donde son capturados y removidos.
- **Calefacción eléctrica:** al aplicar una corriente eléctrica al suelo, se calienta el mismo a temperatura moderada ayudando a la extracción de vapor de compuestos orgánicos volátiles. El desempeño de la extracción de vapor puede mejorar por la inyección de aire caliente por pozos de inyección en el suelo contaminado.
- **Valla electrocinética:** se utiliza cuando la remoción de un contaminante por electrocinética no es factible. Este método inmoviliza los metales pesados o cualquier contaminante que lo atraviese.
- **Inyección bioelectrocinética:** funciona como un sistema de transporte de nutrientes para mejorar la biodegradación de contaminantes orgánicos tóxicos.

Para las degradaciones aeróbicas, el oxígeno puede ser generado electroquímicamente y colocado en el sistema junto con los nutrientes.

Las cuestiones clave para el tratamiento eléctrico son: (a) la conductividad eléctrica del suelo, (b) la caracterización iónica de los contaminantes, y (c) el impacto en los objetos enterrados y servicios públicos.

2.4.2.8 Estabilización Biotécnica

Esta nueva forma de mejoramiento de suelos utiliza objetos biológicos (vegetación) como elementos de refuerzo. Se utiliza para la estabilización de taludes o rellenos con pendiente, en la construcción de estructuras de retención en zonas verdes o en zonas medioambientalmente sensibles. La estabilización biotécnica es más económica y medioambientalmente amistosa que otras formas de mejoramiento de suelos, además de mejorar el paisaje proporcionando una ventaja estética. Algunas de las técnicas de estabilización biotécnicas utilizadas actualmente son: (a) hincado de ramas, (b) estratificación de maleza, (c) estratificación por zanjas de caña, (d) esteras de maleza, (e) malla perimetral. De las mencionadas, la técnica (a) y (b) son las más usadas en el campo.

Las descripciones detalladas de cada técnica se explican en los escritos de Gray y Leiser (1982). El suelo y la vegetación interactúan en tres formas: la fricción se desarrolla a lo largo de la interface suelo-tallos, la cohesión artificial es generada por el crecimiento de las raíces en el suelo y la presión de poro se disipa por la evapotranspiración de la vegetación.

2.5 CONGELAMIENTO DE SUELOS

Tal como se mencionó en párrafos anteriores el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de carreteras: Suelos, 2014) indica que:

“En zonas sobre los 4,000 msnm, se evaluará la acción de las heladas en los suelos. En general, la acción de congelamiento está asociada con la profundidad de la napa freática y la susceptibilidad del suelo al congelamiento. Si la profundidad de la napa freática es mayor a la indicada anteriormente (1.20 m), la acción de congelamiento no llegará a la capa superior de la subrasante. En el caso de presentarse en la capa superior de la subrasante (últimos 0.60 m) suelos susceptibles al congelamiento, se

reemplazará este suelo en el espesor comprometido o se levantará la rasante con un relleno granular adecuado, hasta el nivel necesario. [...] En general, son suelos no susceptibles los que contienen menos del 3% de su peso de un material de tamaño inferior a 0.02 mm”.

Lo cual indica lo importante que es la consideración del congelamiento por las heladas en zonas altas, como por ejemplo en diferentes provincias de la región de Puno, las cuales están ubicadas en zonas mayores a 4000 msnm.

2.5.1 Aspectos de la congelación del Suelo.

La congelación del terreno tiene tres aspectos fundamentales:

1. Congelación natural
2. Permafrost
3. Congelación artificial

La congelación natural se produce en zonas frías en las que la temperatura ambiente se mantiene durante largos periodos por debajo de 0°C. El agua en el suelo se va transformando en hielo cada vez a mayor profundidad, según un proceso conocido como penetración de la helada.

Este proceso va acompañado de un levantamiento del terreno que es superior al que cabría esperar por el aumento del volumen del agua al convertirse en hielo, ya que, junto al fenómeno de transferencia de calor desde las zonas más cálidas a las más frías, tiene lugar otro de migración de humedad que hace crecer los lentejones de hielo formados entre las partículas de suelo (Figura 2.12). Esta transferencia de humedad puede realizarse en fase de vapor o en fase líquida, según el tipo de suelo.

Durante la época del deshielo se produce el fenómeno contrario, con dos frentes de descongelación: uno por encima y otro por debajo de la zona helada, que va acompañado de ablandamiento del suelo, pérdida de su capacidad portante y asientos relativamente bruscos.

Estos procesos de la helada y el deshielo provocan graves daños, no solo en las conducciones y estructuras subterráneas, sino también en todo tipo de obras con profundidad de cimentación inadecuada, en estructuras de contención y particularmente en los pavimentos de carreteras y aeropuertos. En este último caso (Figura 2.13), la limpieza de nieve en la calzada y la acumulación sobre los arcones (berma) favorece la

penetración de la helada sobre la primera, ya que la nieve es un buen aislante térmico. Durante el deshielo se producen roderas, roturas del firme y una “ebullición del suelo” agravada por la presencia de nieve en los arcenes que conserva heladas las facilidades de drenaje. (Muzás Labad, 1979)

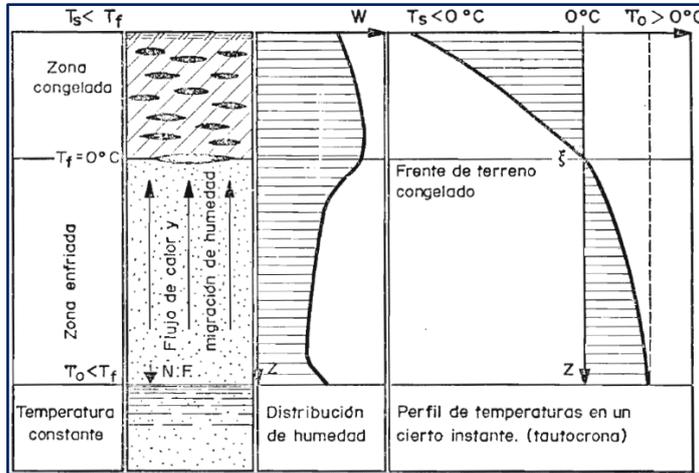


Figura 2.13: Congelación natural del suelo.

Fuente: (Muzás Labad, 1979)

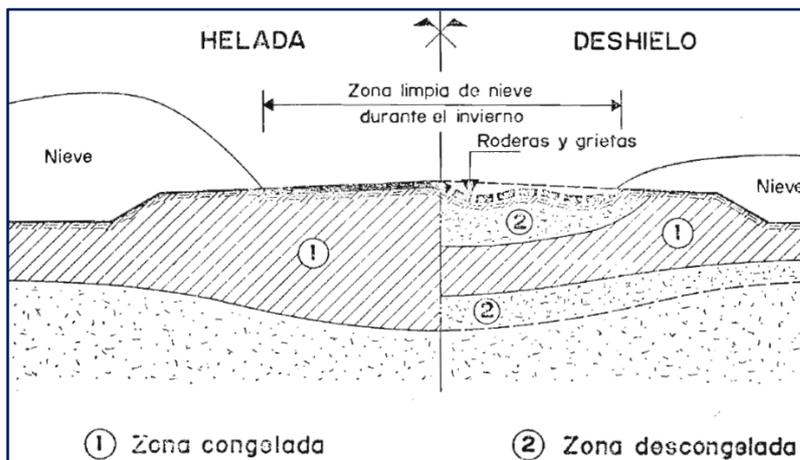


Figura 2.14: Daños producidos en una carretera durante la época de deshielo.

Fuente: (Muzás Labad, 1979)

El fenómeno del permafrost se da en regiones muy frías, donde la temperatura media anual inferior a 0°C. El terreno en profundidad se encuentra permanentemente helado (por lo que recibe el nombre de “perma-frost”), y solo una capa superficial se ve sometida a ciclos de hielo y deshielo que plantean problemas similares a los enunciados anteriormente. (Muzás Labad, 1979)

Como contrapartida a los daños provocados por la congelación natural del terreno, ya en el último tercio del siglo pasado comenzaron a aprovecharse las propiedades de resistencia e impermeabilidad del suelo congelado, provocándola de manera artificial en

trabajos mineros, para atravesar zonas difíciles bajo el nivel freático. Desde entonces, encontrando aplicaciones cada vez más importantes en diversos campos de la ingeniería civil y de la edificación. (Muzás Labad, 1979)

2.5.2 Propiedades físicas de los suelos congelados.

El suelo congelado es uno de los materiales más complejos, pues a las tres fases de que normalmente consta un suelo se incorpora una cuarta, el hielo, de comportamiento visco plástico. De hecho, pueden coexistir las cuatro fases, ya que, aunque se alcancen temperaturas inferiores a 0°C , no siempre se congela toda el agua, aparte de que puede quedar aire atrapado en la masa congelada, según como se efectuó la congelación.

La transformación del agua en hielo no se produce de la misma forma en las arenas que en las arcillas. En los suelos arcillosos, el agua absorbida se congela a temperaturas más bajas que el agua libre, tanto menores cuanto más próxima se encuentra a la partícula sólida. Prácticamente la congelación completa del agua solo tiene lugar a temperaturas inferiores a -20°C .

La textura criogénica del suelo congelado, es decir, el tamaño de los cristales de hielo y su distribución, depende de la granulometría del suelo, de la rapidez e intensidad de la congelación y del grado de saturación, pudiendo ser homogénea o en forma de malla en congelaciones rápidas e intensas, o estratificada en congelaciones lentas con migración de humedad. (Muzás Labad, 1979)

Los problemas de congelación natural o artificial del suelo son problemas de transmisión de calor (normalmente por conducción) y de cambio de estado del agua en hielo. Dependen, por tanto, de las propiedades térmicas de los componentes del suelo.

El agua, elemento fundamental en la congelación de suelos, tiene, a la presión atmosférica, su densidad máxima $\delta_w=1.0 \text{ g/cm}^3$, a la temperatura de 4°C , y experimenta al transformarse en hielo un aumento de volumen del 9 por ciento, con lo que adquiere una densidad $\delta_i=0.9168 \text{ g/cm}^3$.

Para transformar el agua en hielo es preciso extraerle una energía equivalente al calor latente de fusión $Q_L= 80 \text{ Cal/kg}$. Puede comprobarse que al congelar un suelo hay que extraer una cantidad pequeña de calor para refrigerar las partículas sólidas, siendo más importante el calor a extraer del agua, principalmente por el cambio de estado. (Muzás Labad, 1979)

Como resumen, los fenómenos que tienen lugar durante la congelación son:

1. Transmisión de calor
2. Transformación del agua en hielo
3. Migración de humedad
4. Formación de lentejones de hielo
5. Penetración de la helada
6. Levantamiento del suelo
7. Modificación de las propiedades térmicas
8. Modificación de las propiedades mecánicas
9. Impermeabilización del suelo

2.5.3 Características mecánicas del suelo congelado y propuestas para su evaluación en laboratorio.

El suelo congelado se comporta mecánicamente como un material visco-plástico. Sus características resistentes dependen fundamentalmente del tipo de suelo y del contenido de hielo, pero son función de la temperatura y de la duración de la carga aplicada. El comportamiento resulta muy similar al de los plásticos o de ciertos materiales a alta temperatura, dado que el hielo se encuentra a temperaturas muy próximas a las de fusión.

En la Figura 2.15 pueden verse las curvas de fluencia de unos ensayos a compresión simple, efectuados con probetas de arena congelada a temperatura constante. Los resultados son típicos también para limos y arcillas. Con bajos niveles de tensión parece que la deformación tiende asintóticamente a un valor fijo, con velocidad de deformación que se atenúa con el tiempo. Para niveles de tensión intermedia, las curvas tienen una forma similar a las clásicas curvas de fluencia de los metales, con tres fases perfectamente diferenciadas: una primera con velocidad de deformación decreciente, una segunda con velocidad de deformación constante y una tercera con velocidad de deformación creciente hasta llegar a la rotura. Para elevados niveles de tensión, el comportamiento es análogo al anterior, aunque con una duración muy breve de las dos primeras fases. (Muzás Labad, 1979)

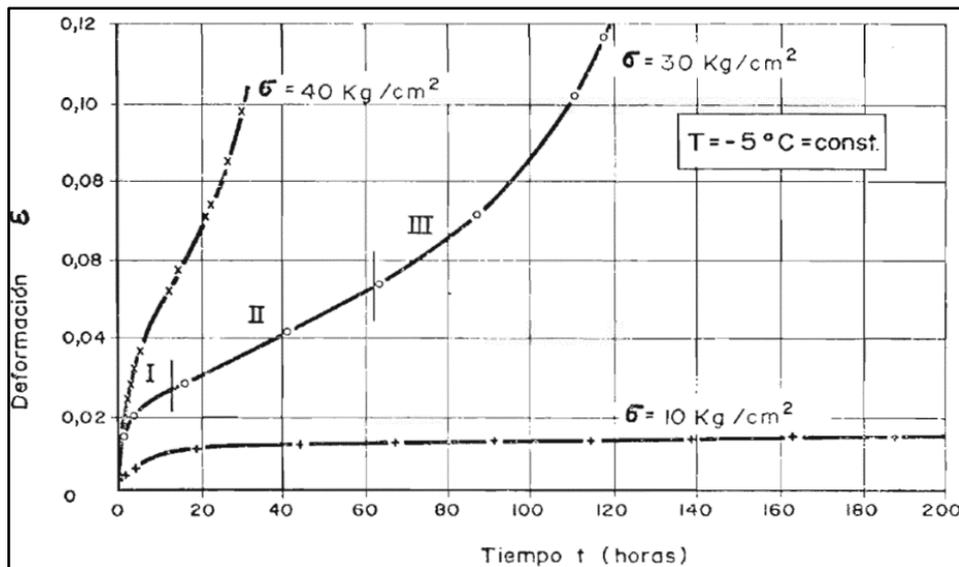


Figura 2.15: Curvas de fluencia de arena media congelada en ensayos de compresión simple.

Fuente: (Muzás Labad, 1979)

La resistencia del suelo congelado puede definirse por los parámetros de cohesión y rozamiento, al igual que un suelo sin congelar, con la diferencia de que dichos parámetros son función del tiempo y de la temperatura. La componente de resistencia debida al rozamiento se debe esencialmente al contacto entre los granos de las partículas sólidas, y es razonable esperar que sea independientemente de la temperatura. En los suelos gruesos con poco contenido de hielo (arenas), el ángulo de rozamiento interno resulta ligeramente inferior al del suelo sin congelar. En los suelos ricos en hielo y con pocas partículas en contacto dominan las propiedades viscosas del hielo. **Los parámetros resistentes se determinan mediante ensayos normalmente de compresión simple, y en ocasiones de tracción y triaxiales.**

Los resultados dependen evidentemente de las características del suelo, de la temperatura de congelación y de la velocidad de aplicación de la carga. La rotura puede ser frágil, con carga rápida, cuando el suelo tiene poco contenido de hielo, pero en general la rotura es viscosa, definiéndose el tiempo de rotura como el final de la fase en que la velocidad de deformación se mantiene constante.

La resistencia disminuye con el tiempo de aplicación de la carga, según puede observarse con la Figura 2.16. el descenso más fuerte se produce en la primera hora, con reducciones del 30 al 40 por ciento según el tipo de suelo. A largo plazo, puede estimarse que la resistencia es igual a la mitad de la resistencia instantánea, tratándose de arenas, e igual a la tercera parte en el caso de arcillas. (Muzás Labad, 1979)

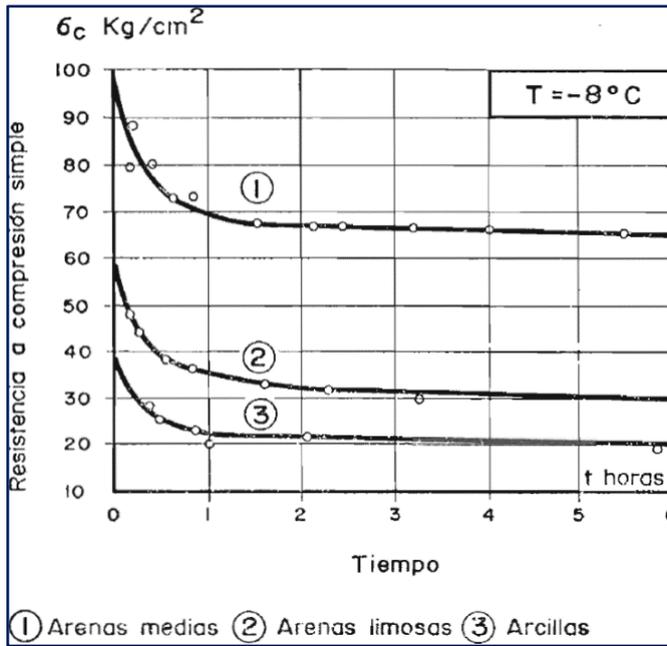


Figura 2.16: Variación de la resistencia a compresión simple en función del tiempo.

Fuente: (Muzás Labad, 1979)

En la Figura 2.17 se han recogido algunos valores de resistencia de tres tipos de suelos en función de la temperatura de congelación y del tiempo de aplicación de la carga que ilustran su variación y permiten estimar las características resistentes de un suelo congelado. (Muzás Labad, 1979)

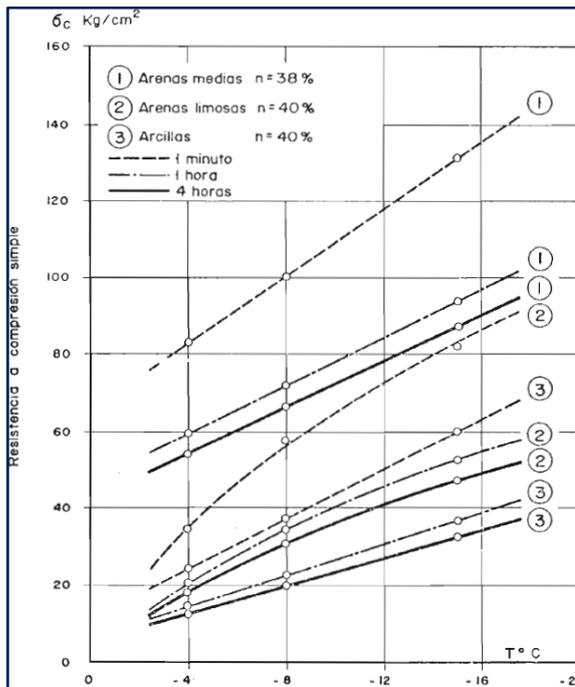


Figura 2.17: Resistencia a compresión simple de varios suelos congelados. (Datos tomados de Nanosov, 1968).

Fuente: (Muzás Labad, 1979)

2.5.4 El congelamiento de suelos, factor importante en zonas altas.

Está claro que el efecto de la helada en los suelos ocasiona un comportamiento peligroso para las obras construidas sobre él, por otro lado; podemos mencionar también que el efecto de las temperaturas a punto de congelamiento afecta también a los pavimentos y que no son fáciles de cuantificar. Se observa con frecuencia que los pavimentos sufren daño significativo inmediatamente después de fuertes heladas, y no es difícil imaginar sus mecanismos de acción. El agua se expande para formar hielo, por lo que, como en el concreto, esto hace que las presiones dentro de la matriz del asfalto causen fractura local en los contactos de las partículas del agregado. La interacción entre los vacíos llenos de agua y vacíos llenos de hielo durante la congelación y deshielo también puede dar lugar a presiones dinámicas inusualmente altas bajo cargas de tráfico. El hecho de que el material bituminoso sea frágil requiere de muy pequeños esfuerzos para causar la fractura). El secreto de la protección contra las heladas es más o menos la misma que la de la protección contra el agua. Si el asfalto es denso ($\leq 5\%$ vacíos), entonces el agua no penetra fácilmente, y por lo tanto; la formación de hielo no será un problema. (Supo Pacori, 2015)

2.5.5 Acción de las heladas en los suelos.

Éste es uno de los aspectos que debe tenerse en cuenta al estudiar los suelos, especialmente para el caso de los pavimentos en calles, caminos y aeropuertos. Cuando se tiene un exceso de agua libre en el suelo y ésta se congela, entonces se torna sólida y aumenta su volumen; por tanto, el suelo que la contiene también aumenta de volumen, es decir, se hincha. Los efectos que el hielo produce en el suelo se prolongan por muchos meses, de acuerdo con las experiencias obtenidas de las pruebas efectuadas en los Estados Unidos de América al respecto. Contó consecuencia, es muy importante que se conozcan los suelos que son susceptibles a las heladas, aunque en verdad los fenómenos de la acción de las heladas son muy complejos. Para que el hinchamiento debido a la congelación del agua libre en los suelos se presente es necesario que el ingeniero sepa que deben presentarse conjuntamente los siguientes factores:

- Contar con un suelo susceptible a las heladas.
- Existencia de una fuente de abastecimiento de agua, o sea; exceso de agua en el suelo.
- Contar con una lenta reducción en la temperatura del aire.

Si alguno de los anteriores factores no se encuentra presente entonces no hay una verdadera expansión del suelo por la acción de las heladas. (Supo Pacori, 2015)



Figura 2.18: Trochas carrozables congeladas en Laraqueri-Puno, Perú.

Fuente: (Diario el Comercio, 2015)

2.5.6 Clasificación de acuerdo a la susceptibilidad de los suelos a las heladas.

Según los estudios hechos por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, los suelos susceptibles a las heladas son todos aquellos suelos inorgánicos que contienen más de 3% en peso de partículas menores de 0.02 mm. La Tabla que muestra la figura 2.13 se emplea mucho para conocer la susceptibilidad de los suelos a las heladas, y en ella los materiales del grupo F1 son los menos susceptibles, y los suelos más peligrosos a la acción de las heladas son los que combinan una granulometría fina con una gran permeabilidad. Los suelos F4 generalmente no se recomiendan en aquellos lugares donde se tema una acción fuerte de las heladas.

Según A. Casagrande, un suelo puede considerarse como no susceptible a la helada si posee menos de un 3% de partículas menores de 0.02 mm. El intervalo crítico en el cual el material empieza a mostrarse susceptible está entre 3% y 10% de contenido de aquellas partículas, dependiendo de sus características granulométricas. Los suelos susceptibles a la acción de las heladas pueden clasificarse como se muestra en la figura 2.13, ampliamente usada por los técnicos de todo el mundo. En esa tabla los suelos aparecen agrupados en orden creciente de susceptibilidad. (Supo Pacori, 2015)

GRUPO	DESCRIPCIÓN DEL SUELO
F_1	Gravas con 3% a 20%, en peso, de partículas menores que 0.02 mm.
F_2	Arenas con 3% a 15%, en peso, de partículas menores que 0.02 mm.
F_3	a) Gravas con más del 20%, en peso, de partículas menores que 0.02 mm, y arenas (excepto las finas limosas) con más de 15%, en peso, de partículas menores que 0.02 mm. b) Arcillas con índice plástico mayores de 12 mm con excepción de las finamente estratificadas.
F_4	a) Todos los limos inorgánicos, incluyendo los arenosos. b) Las arenas finas limosas con más de 15%, en peso, de partículas menores que 0.02 mm. c) Arcillas con índice plástico menor de 12% d) Arcillas finamente estratificadas.

Figura 2.19: Susceptibilidad de los suelos a la helada.

Fuente: (Supo Pacori, 2015)

2.5.7 Índice de congelación.

La profundidad de la zona de congelación de un suelo depende, según se dijo, tanto de la duración, como del valor de las temperaturas que el ambiente alcance bajo el punto de congelación. Para tomar en cuenta ambos factores en la profundidad de penetración de una helada, se ha creado el concepto de Índice de congelación, (I_c). Para los efectos que siguen, se entenderá por un número de grados-día ($^{\circ}\text{C-día}$) la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura de congelación del agua. Expresando la temperatura en grados centígrados, la temperatura de congelación del agua es 0°C y el número de grados-días coincide con la temperatura media diaria.

Si se dibuja para un invierno una gráfica acumulativa de grados-día contra el tiempo, expresado en días, se obtiene una curva del tipo de la mostrada en la figura 2.14.

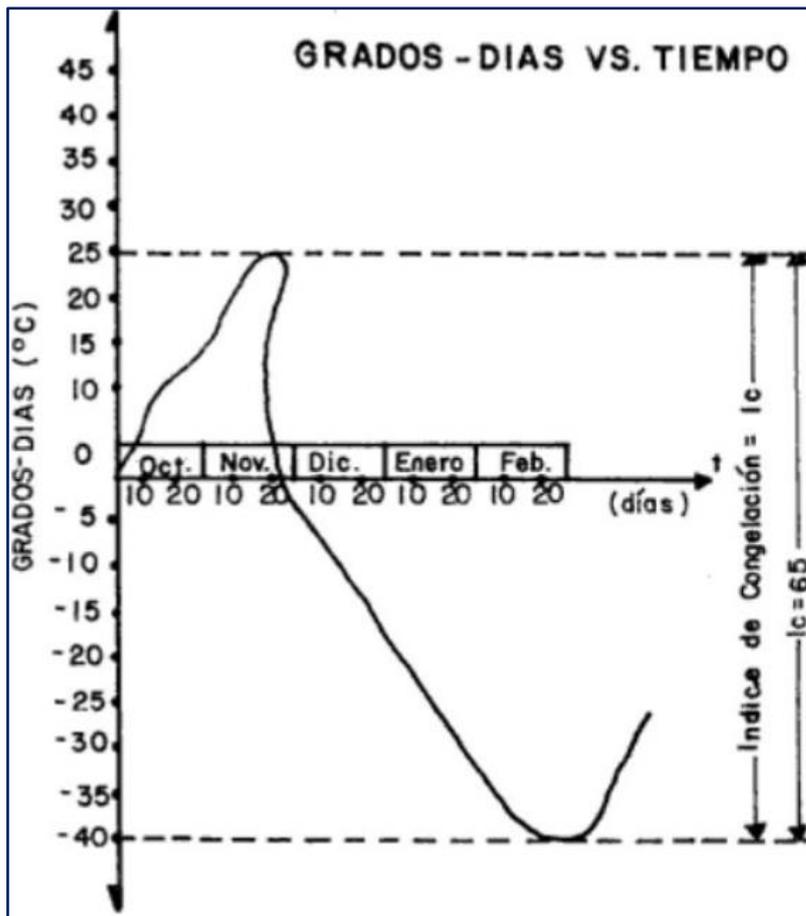


Figura 2.20: Determinación del índice de congelación (I_c).

Fuente: (Supo Pacori, 2015)

En dicha gráfica el índice de congelación puede calcularse como el número de grados-día entre los puntos máximo y mínimo de la curva. El índice de congelación está, así, ligado a un invierno dado. La aplicación principal de estos conceptos ha sido hecha en la construcción de caminos y aeropistas, en donde se tienen curvas experimentales sobre los espesores mínimos de material no susceptible, que deben colocarse para proteger al suelo situado bajo la subrasante de los efectos de la congelación. Es normal dar estos espesores de protección en términos del índice normal de congelación de las regiones de que se trate, correspondiendo, como es obvio, los mayores espesores de capas protectoras a los mayores índices. Una vez determinado el índice de congelación, es posible determinar la profundidad que penetrará la congelación en el suelo, utilizando el ábaco de la figura 2.15. (Supo Pacori, 2015)

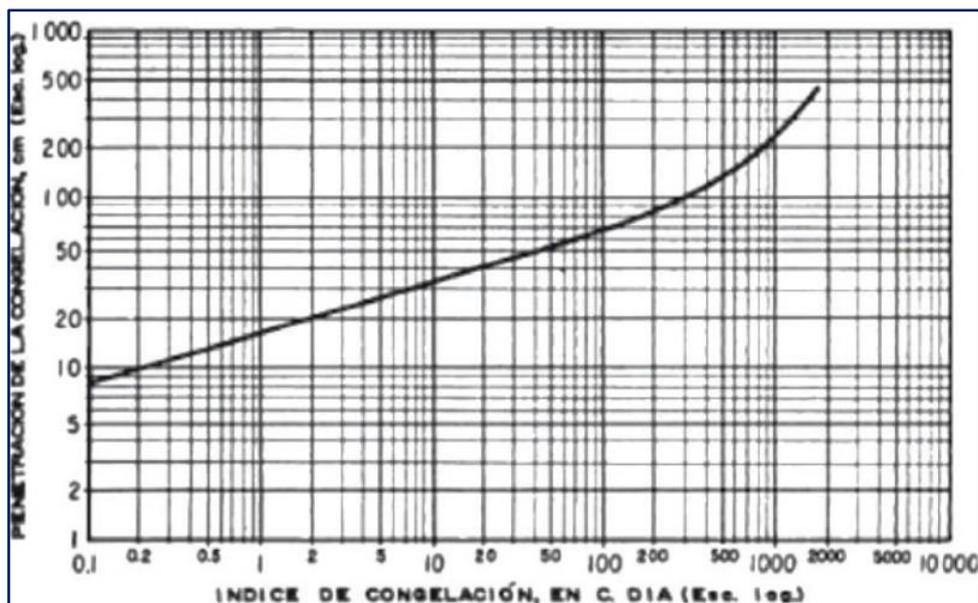


Figura 2.21: Penetración de la congelación en función del Ic.

Fuente: (Supo Pacori, 2015)

2.5.8 Daño del congelamiento al suelo de fundación de pavimentos.

La prueba de expansión por helada (Croney y Jacobs, 1967; ASTM, 2013, versión de EE.UU.) ha sido ampliamente utilizado en el Reino Unido para dar una medida de la forma en que la formación de hielo destruye la estructura de un material, siguiendo una serie heladas graves experimentadas en las principales carreteras de la década de 1960, y es habitual que insistir en que todo el material a menos de 450 mm de la superficie tiene un valor apropiadamente bajo de levantamiento por helada. El efecto inmediato de movimiento vertical por heladas es la pobre calidad de la superficie para el tránsito, aunque esto se restaura en gran medida una vez que el hielo se ha derretido. Sin embargo, el legado de un período de movimiento vertical es el daño a las capas de pavimento no ligadas ocasionando un ablandamiento irreversible debido a cambios en la estructura del suelo. Además, si las heladas alcanzan una capa de sub-base estabilizada, entonces esto puede afectar dramáticamente la integridad de los enlaces entre las partículas, y por lo tanto la fuerza y la rigidez de la capa; por lo tanto, los materiales susceptibles a heladas deben protegerse adecuadamente. La estrategia tiene inevitablemente a depender del clima. En el Reino Unido, no es difícil prevenir el congelamiento del suelo; en la Europa continental, el espesor de la protección contra heladas requerida es mayor, alcanzando casi un metro en el este de Europa. Suiza está entre los países que hacen uso de una capa aislante en la base de la fundación. En países como Canadá, sin embargo, no hay manera alguna, es económicamente inviable evitar la penetración de las heladas hasta el suelo.

En este tipo de casos la única alternativa es impedir al suelo, el agua que necesita para que los cristales de hielo crezcan lo suficiente como para causar movimiento vertical. El drenaje, junto con la prevención de la entrada de agua a través de la superficie, se vuelven críticas. Una estrategia final y bastante aceptable es simplemente permitir que el levantamiento por helada suceda. El uso de un aglutinante muy suave en las capas de superficies proporciona una flexibilidad suficiente para acomodar grandes deformaciones, incluso a temperaturas muy bajas, y aunque se producirá agrietamiento durante el invierno, la remediación se llevará a cabo en el verano. En Escandinavia, se han utilizado tradicionalmente las llamadas gravas petroleras en estas situaciones. Estas mezclas utilizan una emulsión asfáltica muy suave como aglutinante, extremadamente resistente al agrietamiento a baja temperatura, aunque menos resistentes a la fatiga convencional y la abrasión. Esta estrategia, obviamente, no es adecuada para las carreteras muy transitadas, pero es bastante aceptable en carreteras secundarias. El levantamiento por helada puede ser contrarrestada con una textura relativamente abierta y un buen drenaje, los pequeños huecos llenos de agua, por lo tanto, serán insuficientes; pero la congelación de las propias partículas también puede ocasionar graves daños si esas partículas son porosas. Este peligro no es normalmente controlado directamente, y se confía en los descriptores generales tales como "limpia y dura", pero cualquier agregado con una absorción mayor a aproximadamente 0,5% debe considerarse potencialmente en riesgo. (Supo Pacori, 2015)

2.6 POLIETILENO TEREFALATO (PET)

2.6.1 Introducción

El Tereftalato de Polietileno (Polietileno Tereftalato - PET), fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J.T. Dicknson en 1941. Dicho polímero comenzó a ser utilizado a partir de 1955 para la producción de envases de líquidos (Estrucplan on Line). A través del tiempo la industria del plástico ha ido en aumento y ha sustituido diversos materiales tales como el vidrio, la madera y el cloruro de polivinilo (PVC) por el PET, ya que el mismo es un material caracterizado por su gran ligereza y resistencia mecánica a compresión, posee alto grado de transparencia y brillo, conserva el sabor y olor de los alimentos, y es una barrera contra los gases. La producción anual de envases de PET en el mundo es aproximadamente de 207 millones de Toneladas, cifra que va aumentando considerablemente a nivel mundial (Vázquez, 2003).

El PET es uno de los materiales más útiles en la vida cotidiana, pero uno de los que genera más contaminación en el mundo. Ante esta disyuntiva, su reciclaje se convierte en uno de los principales temas a tratar en los congresos de reciclaje a nivel mundial, como por ejemplo en el II Congreso Nacional de Demolición y Reciclaje realizado en mayo de 2004 en Zaragoza, España, además del Séptimo Congreso Internacional de Reciclaje realizado en julio de 2004 en La Habana, Cuba, entre otros. (Alesmar, Rendón, & Korody, 2008)

Símbolo	Tipo de Plástico	Propiedades	Usos Comunes
PET	PET PolietilenTereftalato (Polyethylene Terephthalate)	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.)
HDPE	HDPE Polietileno de alta densidad (High Density Polyethylene)	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C	Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.
PVC	PVC Policloruro de vinilo (Plasticised Polyvinyl Chloride PCV-P)	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, claro, elástico, puede ser utilizado con solventes.	Envases para plomería, tuberías, "blister packs", envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.
LDPE	LDPE Polietileno de baja densidad (Low density Polyethylene)	Suave, flexible, translucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.
PP	PP Polipropileno (Polypropylene)	Difícil pero aún flexible, se suaviza a los 140°C, translucido, soporta solventes, versátil.	Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empacar, envases para uso veterinario y farmacéutico.
PS	PS Poliestireno (Polystyrene)	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos.
PS-E	PS-E Poliestireno Expandido (Expanded Polystyrene)	Esponjoso, ligero, absorbe energía, mantiene temperaturas	Tazas para bebida calientes, charolas de comida para llevar, envases de hielo seco, empaques para proteger mercancía frágil
OTHER	OTHER Otros (SAN, ABS, PC, Nylon)	Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos.	Auto partes, hieleras, electrónicos, piezas para empaques.

Figura 2.22: Códigos, propiedades y usos de los plásticos

Fuente: (Sociedad de la Industria de Plásticos, 1988)

2.6.2 Definición

El PET es un material caracterizado por su gran ligereza y resistencia mecánica a la compresión, alto grado de transparencia y brillo, conserva el sabor y aroma de los alimentos, es una barrera contra los gases, reciclable 100% y con posibilidad de producir envases reutilizables, lo cual ha llevado a desplazar a otros materiales, como, por ejemplo,

el PVC, el cual presenta una demanda creciente en todo el mundo. El PET es el material plástico con el cual se elaboran los envases de bebidas gaseosas y aguas minerales, entre otras. Las botellas son desechables, por lo que su destino suele ser la bolsa de basura y, por extensión, los rellenos sanitarios donde se depositan los residuos domiciliarios. El PET es producido a partir del petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. (Alesmar, Rendón, & Korody, 2008)

2.6.3 Cualidades del Tereftalato de Polietileno (PET).

Según (Sherwell Betancourt, 2014) las características más relevantes del PET son:

Tabla 2.3: Características más relevantes del PET

TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)	Características más relevantes del PET
	Alta transparencia y cristalinidad, aunque admite cargas de colorantes.
	Liviano, permite que una botella pese 20 veces menos que su contenido.
	Alto coeficiente de deslizamiento.
	Alta resistencia química y buenas propiedades térmicas, posee una gran indeformabilidad al calor.
	Levemente tóxico, liberan antimonio (Sb) por debajo de los límites admisibles por la OMS (20 µg/L).
	Actúa como barrera a CO ₂ , aceptable barrera a O ₂ y la humedad.
	Compatible con otros materiales que mejoran en su conjunto la calidad barrera que permiten su uso en mercados específicos.
	Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.

Estabilidad a la intemperie.

Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad, adecuado para fibras.

Biodegradación muy lenta.

Alta resistencia a la corrosión, a esfuerzos permanentes y transitorios.

Impermeable

Fuente: Elaboración propia

Los grados de productos de PET más utilizados en la industria son tres:

1. Grado Textil: utilizado para fabricar fibras sintéticas, principalmente poliéster, en sustitución de algunas como algodón o lino. El polietileno tereftalato encabeza a los polímeros textiles.

2. Grado Botella: utilizado para fabricar botellas, ya que ofrece características favorables en cuanto a resistencia contra agentes químicos, gran transparencia, ligereza, menores costos de fabricación y comodidad en su manejo. Se asocia con el embotellado, pero tiene infinidad de usos dentro del sector de fabricación de envases.

3. Grado Film: utilizado en gran cantidad para la fabricación de hojas de plástico. En la práctica, películas fotográficas, de rayos X y de audio están hechas de PET.

Existen otros productos, tales como: resinas, combustible alterno, muebles, autopartes, etc. La gama de productos que incluyen al polietileno tereftalato es muy grande, y por consecuencia de los altos niveles de consumo, se tiene de la misma forma gran cantidad de residuos. Por lo que es importante tener una cultura de reciclaje para dicho material. (Sherwell Betancourt, 2014) en la figura 2.12 se muestra el diagrama de flujo para la producción del PET.

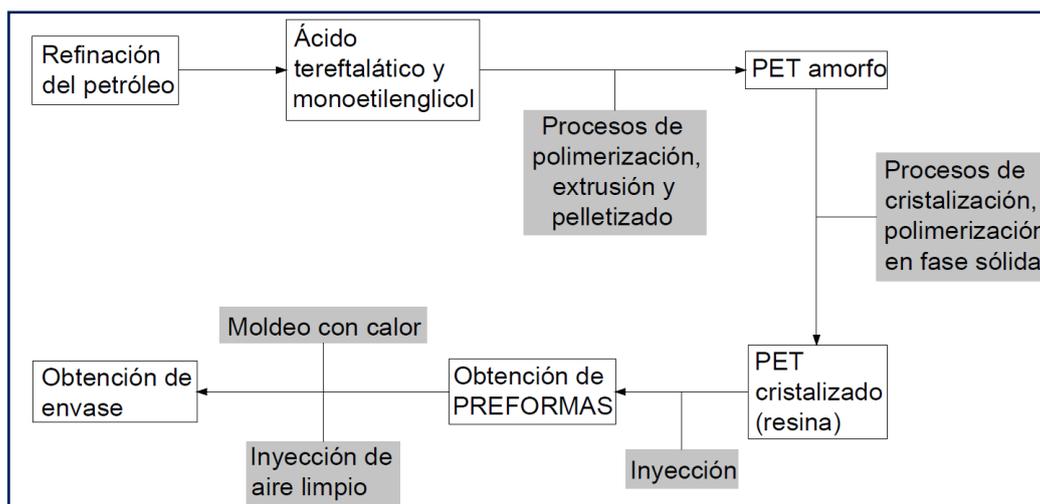


Figura 2.23: Diagrama de flujo para la producción del PET.

Fuente: (Sherwell Betancourt, 2014)

Para la fabricación de la resina PET, se han implementado algunas estrategias para minimizar los impactos adversos al ambiente durante la producción, de los cuales podemos mencionar, que se utiliza gas natural como fuente energética para la generación de vapor y para algunas fases de calentamiento, se han controlado las emisiones a la atmósfera a través de oxidantes térmicos, además del tratamiento de aguas residuales, entre otros. La ausencia de cementantes y la barrera de gases que tiene el PET, le confirió gran difusión como envase de bebidas gaseosas, sifones y posteriormente otros productos como aceites, mayonesas, cosméticos, etc.

Pero no sólo esas propiedades influyeron en esta elección de los industriales y el público consumidor; su escaso peso en relación al del producto adquirido y fundamentalmente la seguridad de los usuarios ante una eventual rotura fueron factores determinantes para la generalización de su uso. Existen diferentes alternativas en las cuales se puede reutilizar el PET desde el reciclado mecánico, químico y algunos procesos planteados en diversos países para reusarlo con el fin de disminuir su impacto ambiental y el volumen de éstos en los rellenos sanitarios.

Actualmente se utilizan para el reciclado los procesos mecánicos convencionales, los cuales a grandes rasgos consisten en el triturado del producto, seguido por la limpieza eliminando impurezas de otros materiales a grandes temperaturas para finalmente ser sometido a una extrusión con temperatura y presión requerida para la obtención de un producto final.

El Tereftalato de Polietileno puede ser degradado mediante diferentes métodos: los procesos naturales y procesos químicos. Siendo los procesos químicos los que dan un reuso del material debido a que puede ser modificada su estructura molecular. El proceso natural de degradación tarda una gran cantidad de tiempo debido al tiempo de vida del PET, el cual es mayor a 50 años. Con el fin de no adentrarnos mucho en el tema de degradación, únicamente se mencionan a continuación algunos de los procesos químicos y naturales más utilizados.

Tabla 2.4: Métodos de degradado de PET

Naturales	Químicos
<ul style="list-style-type: none"> • Foto degradación. • Termo-oxidación. • Biodegradación por medio de • microorganismos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Por medio de fluido supercrítico. • Poliestireno disuelto en corrientes petroquímicas. • Hidrocraqueo. • Hidrólisis alcalina.

Fuente: Elaboración propia

2.6.4 El PET y su situación en el Perú

2.6.4.1 Conciencia Ambiental y Reciclaje

La conciencia ambiental, que lleva a la ingeniería a la configuración de sistemas tecnológicos y procesos productivos eficientes que armonicen con el entorno, deriva necesariamente en la idea de reciclar. El desarrollo industrial y tecnológico, si bien ha traído innumerables beneficios sociales, también ha tenido repercusiones negativas y de difícil reversibilidad en el planeta. Por ello, resulta un imperativo la formación en una sólida ética ambiental en las facultades y escuelas de ingeniería, así como la divulgación sostenida de alternativas de tecnologías limpias que contribuyan a paliar los efectos nocivos que la sociedad posmoderna está generando. En tal sentido, y dado el importante auge que ha tenido la industria de bebidas gaseosas en los últimos años, en el mundo se han desarrollado diferentes tecnologías que recuperan y reutilizan los envases plásticos de bebidas gaseosas no retornables y retornables, haciendo de este sector un poco menos dañino para el entorno ambiental. (Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009)

2.6.4.2 La naturaleza del PET y la dinámica de la importación de resinas PET en el país.

Un kilogramo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos de gas natural y 13% de aire. El paraxileno, extraído del petróleo crudo, permite la obtención del ácido tereftálico al oxidarse con el aire. Por su parte, el etileno, derivado del gas natural, se oxida con aire para la obtención del etilenglicol. El PET resulta de la combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol. En cuanto al PET, usado masivamente en la industria de bebidas, registra una participación de alrededor del 65% de todos los envases. Este insumo se importa como resina ante el escaso desarrollo de la industria petroquímica nacional y su costo incide considerablemente en los márgenes industriales. Ello hace que la industria de bebidas gaseosas sea muy dependiente de las fluctuaciones en la cotización internacional del insumo. En el año 2007 el precio promedio de importación de resina PET alcanzó los US\$1.471 por TM. La principal procedencia de la resina para la elaboración de envases es Estados Unidos (43%) y Taiwán (41%).⁴ Otros países proveedores son China, Korea, Hong Kong y Colombia. (Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009)

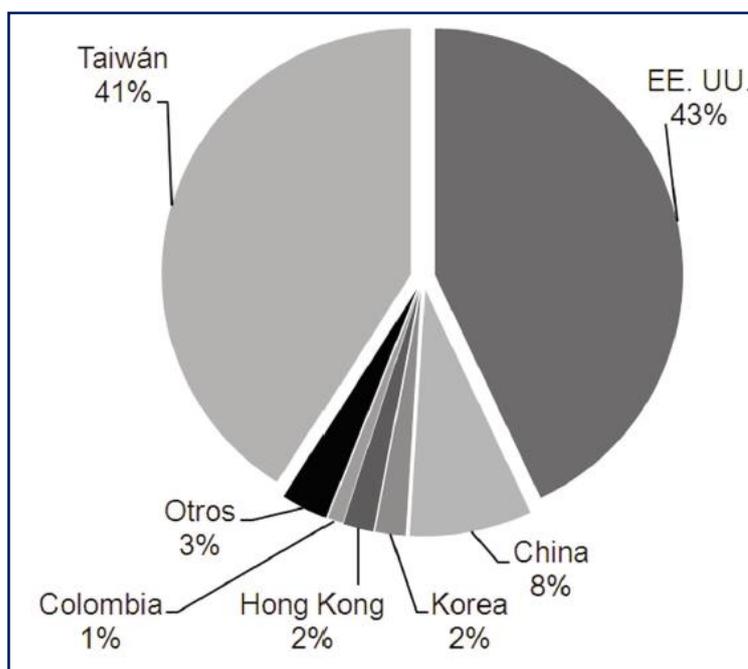


Figura 2.24: Proveedores de Resinas PET (% de participación)

Fuente: (Sunat Maximixe, 2008) citado en (Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009)

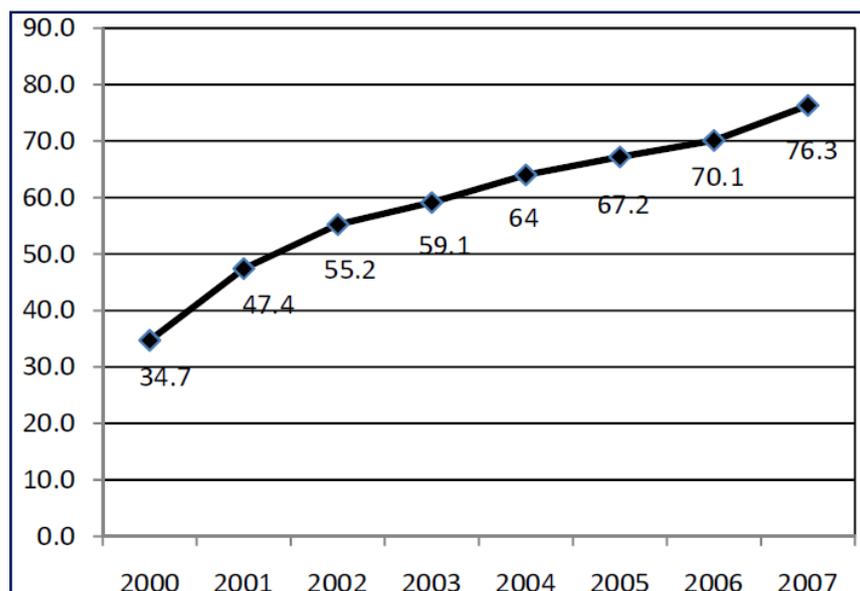


Figura 2.25: Consume de resinas PET (miles de TM)

Fuente: (Sunat Maximixe, 2008) citado en (Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009)

Los últimos años se caracterizaron por una atractiva demanda interna, que benefició a la industria de bebidas gaseosas. Este escenario favoreció, como era de esperar, la entrada de nuevas marcas al mercado que generaron un mayor aumento en las importaciones de resinas PET para la fabricación de las preformas de botellas. Son dos las empresas locales que fabrican en conjunto más de 1.300 millones de envases PET al año. Se trata de San Miguel Industrial y Amcor Pet Packaging, cuya producción presenta cierta estacionalidad a causa del fuerte aumento de la demanda de sus compradores durante los meses de verano. En los meses invernales procuran compensar la caída en la demanda (especialmente de botellas familiares) con envíos al exterior y con la fabricación de envases personales. En el 2008, San Miguel Industrial destinó el 83% de sus exportaciones (alrededor de 400 millones de unidades de preformas PET) a Colombia, Bolivia y Ecuador. Por su parte, Amcor Pet Packaging destinó el 47% de sus exportaciones (89 millones de preformas PET) a Venezuela y República Dominicana. El mercado colombiano se está volviendo atractivo para esta empresa, ya que los volúmenes de exportación a ese país van en aumento. (Mansilla Pérez & Ruiz Ruiz, 2009)

2.6.5 Generalidades sobre contaminación por residuos sólidos.

En el Perú, en la totalidad de ciudades se presentan problemas ocasionados por el inadecuado manejo de los residuos. Estos problemas son causas de la contaminación del aire, del agua, suelo y de la existencia de problemas de salud ocupacional, así como de la

salud pública. Estos residuos, son los envases de PET, PVC, multicapas o similares, los cuales se encuentran en calles, avenidas y botaderos de todas las ciudades del país, así como flotando en canales de riego, ríos, lagos y mares, generando problemas de deterioro del paisaje, contaminación del aire por la quema, persistencia en el medio por el bajo nivel de biodegradación, entre otros. La composición promedio nacional de los residuos sólidos municipales consta de 54.5% de materia orgánica putrescible, 20.3% de materiales altamente reciclables (papel, cartón, plásticos, vidrios, etc.) y 25.2% de material no reciclable (Diagnóstico situacional y propuestas de gestión y manejo de los empaques rígidos para productos de consumo masivo, 2004) tal como se muestra en la siguiente tabla 2.5. (Quispe Supo, 2014)

Tabla 2.5: Composición promedio nacional de los residuos sólidos en el Perú.

TIPO DE RESIDUO	%	TON
Papel	6.49	842.81
Cartón	0.97	125.97
Plásticos	4.30	558.41
Vidrios	3.39	440.23
Metales Ferrosos	2.20	285.70
Metales No Ferrosos	0.16	20.78
Textiles y Trapos	1.56	202.58
Cueros y Caucho	0.30	38.96
Maderas	0.93	120.77
Otros	25.20	3272.53
Orgánicos	54.50	7077.49
TOTAL	100.00	12986.23

Fuente: Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos Municipales (EVAL 2002) Informe Analítico Perú. Organización Panamericana de la Salud. Citado en (Quispe Supo, 2014)

2.6.6 Evaluación económica de uso y disponibilidad del PET en Puno.

2.6.6.1 Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2024

En el año 2002, se estimó que la generación de residuos sólidos municipales a nivel nacional era de 12,986 t/diarias, equivalente a 4,74 millones de toneladas anuales; de este total, únicamente el 73,7% era recolectado por los servicios municipales y solo el 19,7% del total se disponía en rellenos sanitarios. Estas condiciones que generaban graves problemas de sanidad pública y contaminación ambiental, llevaron al Consejo Nacional del Ambiente (en adelante, CONAM) a elaborar y aprobar el Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos, el cual estableció lineamientos, estrategias y actividades con el objetivo de mejorar las condiciones de la gestión y manejo de residuos sólidos a nivel nacional en el periodo 2005-2014.

Los resultados de la gestión integral de residuos sólidos en el año 2014 muestran que se generaron 7,5 millones de toneladas de residuos sólidos municipales, de los cuales menos del 50% fueron dispuestos adecuadamente en rellenos sanitarios⁸. Esto demuestra que, si bien se ha dado un avance en la gestión integral de residuos sólidos, los problemas de contaminación ambiental y de salud pública relacionados a estos, están todavía presentes en nuestro país. (Ministerio del Ambiente, Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2024., 2016)

2.6.6.2 Generación de residuos sólidos a nivel nacional, generación per cápita de residuos y composición.

El Perú durante el año 2014 generó un total de 7 497 482 t/año de residuos urbanos municipales, de los cuales un 64% son residuos domiciliarios y un 26% son residuos no domiciliarios, siendo la región costa la que producen la mayor cantidad de residuos, en particular Lima Metropolitana y Callao, donde se genera un promedio de 9 794 t/día.

La generación promedio nacional de residuos sólidos al 2014, fue de 13 244 t/día; teniendo como datos que Lima Metropolitana y el Callao generaron 5 970 t/día, el resto de ciudades de la costa generaron 3 224 t/día, las ciudades de la sierra generaron 2 736 t/día y las ciudades de la selva se generaron 1 314 t/día¹³.

Respecto a la composición de residuos sólidos generados en el 2014 es importante resaltar que el 53,16% de los residuos sólidos son materia orgánica, el 18,64% son residuos no reaprovechables, el 18,64% pertenece a residuos reaprovechables y

finalmente el 6,83% es compuesto por residuos reciclables. (Ministerio del Ambiente, Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2024., 2016)

2.6.6.3 Situación Actual del Manejo de los Residuos Sólidos en la Provincia de Puno.

Según la (Comisión Ambiental Municipal CAM-Municipalidad Provincial de Puno, 2013-2018) en el Plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos de la provincia de Puno-2013 se dice: la inadecuada Gestión de los Residuos Sólidos en la ciudad de Puno se ha visto agravada por el crecimiento poblacional, hábitos de consumo, flujos migracionales, factores que inciden en una mayor generación de residuos sólidos. La capacidad operativa para la recolección, transporte, equipamiento, almacenamiento y barrido de residuos sólidos al año 2012 se ha mejorado, en tanto todavía se tiene limitaciones, el 45% del personal de limpieza presenta un detrimento de la capacidad física, por motivos de enfermedades, motivo por el cual existen conflictos entre los usuarios y los servidores de limpieza, todos estos hechos dan motivo a que el índice de morosidad sea significativo. La presencia de focos infecciosos y calles sucias se vienen erradicando. En Puno el servicio de recolección de residuos sólidos es a diario en zonas comerciales e interdiario por zonas domiciliarias ya establecidas; recientemente en el año 2012 se han adquirido 03 unidades de recolección con las cuales se ha mejorado el servicio. No se cuenta con una planta de reaprovechamiento de residuos, por lo que toda la basura generada va al botadero municipal controlado. La población carece de buenas prácticas en materia de manejo de residuos sólidos, en consecuencia, se tienen altos índices de una participación pasiva.

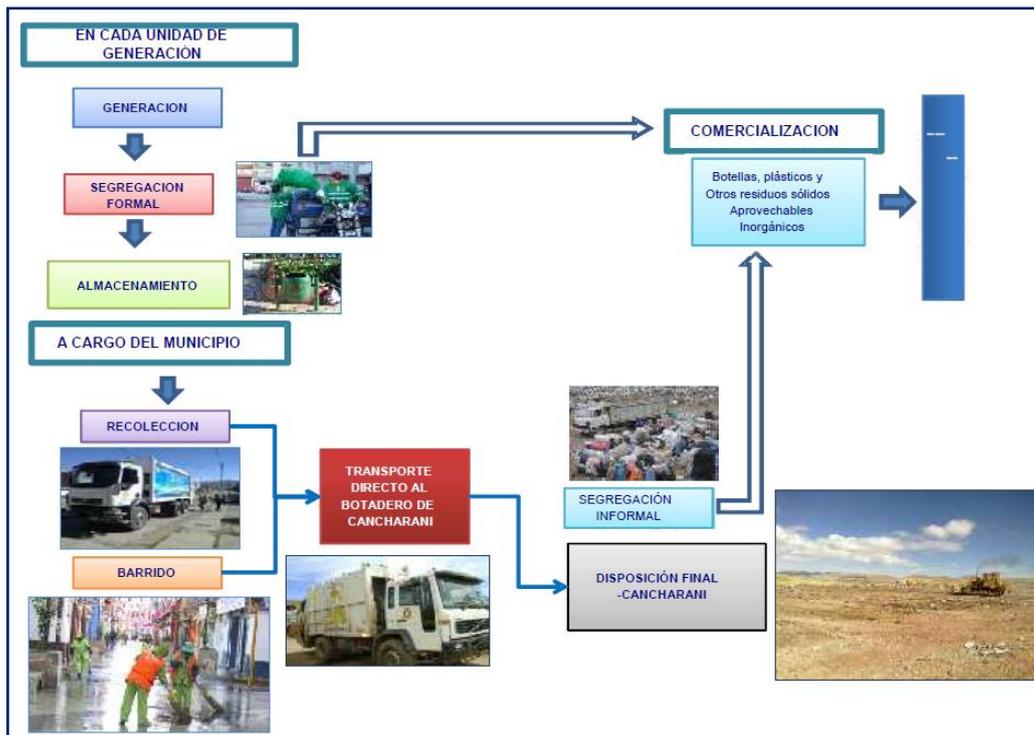


Figura 2.26: Ciclo de producción de los RR.SS.

Fuente: (Comisión Ambiental Municipal CAM-Municipalidad Provincial de Puno, 2013-2018)

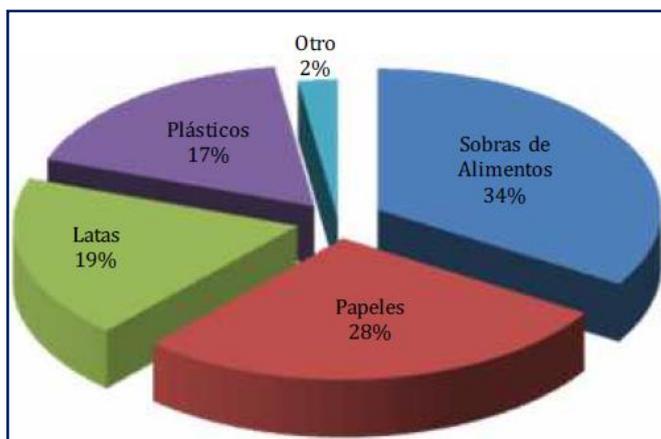


Figura 2.27: Distribución de porcentajes de residuos sólidos que se desecha en los basureros de las viviendas de la ciudad de Puno.

Fuente: (Loayza Idme & Rosas Sardón., 2013)

Siguiendo la metodología propuesta por el CEPIS, se determinó que la generación per cápita de residuos sólidos domiciliarios del distrito de Puno, para el año 2013 es 0.53 kg/hab./día. Teniendo como metodología la recomendada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente-CEPIS, en el Manual “Método sencillo del análisis de residuos sólidos” del Dr. Kunitoshi Sakurai. Proyectando la generación de residuos sólidos domiciliarios, se estiman que se generan 71,51 t/día.

Tabla 2.6: Generación de residuos sólidos municipales de la ciudad de Puno.

Generación de residuos por sector	Generación (kg/día)	Generación (t/día)
Domiciliario	71507,07	71,51
Comercio	3923,89	3,92
Restaurante	4660,49	4,66
Hospedaje	1716,65	1,72
Mercado	4899,41	4,90
Instituciones educativas	2778,38	2,78
Instituciones	629,72	0,63
Barrido de Calles	3023,84	3,02
Total	93139,45	93,14

Fuente: (Comisión Ambiental Municipal CAM-Municipalidad Provincial de Puno, 2013-2018) & (Loayza Idme & Rosas Sardón., 2013)

Los residuos sólidos que no corresponden al ámbito de atención municipal como se presenta en la tabla 2.6, se tienen al hospital MNB, hospital ESSALUD, Clínica Puno y otros establecimientos de Servicio de categoría I, incluidos los centros y postas existentes, las cuales generan 0,266 TM/día que representa el 0.3%, la cual significativamente en relación a la cantidad total generada en la ciudad de Puno (99.7%) no son importantes excepto por las características biocontaminantes del residuo.

Tabla 2.7: Generación de Residuos de ámbito No Municipal. Cantidad Semanal Acumulada Generada (kg/semana)

Establecimiento de salud	Biocontaminados	Especiales	Comunes	Total
Manuel Núñez Butrón	441	45	395	881
Hospital Es Salud	446	78	208	732
Clínica Puno	13	0	16	29
EE. SS. Categoría I y Otros	80	0	136	216

Generación Semanal (kg/semana)	980	123	755	1858
Generación diaria (kg/día)	140	18	108	266
Generación diaria HRMNB (kg/día)	63 (50%)	6 (5%)	56 (45%)	125 (100%)

Fuente: Diagnóstico Basal de la Gestión y Manejo de los Residuos Sólidos de Generados en Establecimientos de Atención de Salud en las ciudades de Cusco, Juliaca, Puno y Arequipa SWISSCONTACT-2010. Citada en (Comisión Ambiental Municipal CAM-Municipalidad Provincial de Puno, 2013-2018)

Tabla 2.8: Generación de residuos sólidos municipales en la ciudad de Puno.

Generación / sector	Generación estimada Tn/día
Generación Per cápita de Residuos sólidos municipales es de 0.69 Kg/hab.día.(*)	
Generación total de residuos sólidos municipales/día	93,14
Generación total de residuos sólidos NO municipales/día	0.266
Generación total de residuos sólidos ciudad de Puno	93,406

(*) Estudio de Caracterización de Residuos sólidos-2013

Fuente: (Comisión Ambiental Municipal CAM-Municipalidad Provincial de Puno, 2013-2018)

2.6.6.4 Composición física de los residuos sólidos

La composición física, está representada de la siguiente forma: 77,9 % son residuos sólidos reaprovechables 64,18% son materia orgánica potencialmente compostificable y 13.72% son residuos sólidos reciclables tales como papel, cartón, plástico, vidrio y metales. (Comisión Ambiental Municipal CAM-Municipalidad Provincial de Puno, 2013-2018)

Tabla 2.9: Composición física de los residuos sólidos en la ciudad de Puno.

CÓDIGO	MATERIALES	PORCENTAJE (%)
A	Residuos compostificables	64.18
A1	Materia Orgánica	61.38
A2	Madera, follaje	2.80
B	Residuos comerciales reciclables inorgánicos	13.72
B1	Papel	1.64
B2	Plástico PET	1.84
B3	Plástico duro	1.85
B4	Vidrio	2.47
B5	Cartón	3.76
B6	Metales ferrosos	1.73
B7	Caucho, cuero, jebe	0.42
C	Residuos reciclables inorgánicos No comerciales	6.40
C1	Tetrapack	0.39
C2	Papel periódico	3.89
C3	Telas, textiles	2.11
D	Residuos No reciclables	3.81
D1	Bolsas de despacho, envoltura de alimentos y otros similares	3.32
D2	Tecopor y similares	0.49
E	Residuos domésticos peligrosos	8.76
E1	Restos de medicina, focos, etc	0.35
E2	Residuos de servicios higiénicos, Pañales descartables	8.41
F	Residuos domésticos inertes y otros	3.13
F1	Residuos inertes (tierra, porcelana, cenizas)	1.02
F2	Otros	2.12

Fuente: (Loayza Idme & Rosas Sardón., 2013)

Estudio de Caracterización de Residuos sólidos-2013.

De acuerdo a la tabla 2.9, existe porcentajes fijos de la composición de residuos sólidos que se generan en la ciudad de Puno. Dentro de los cuales se encuentra el PET (generalmente botellas de plásticos utilizados para el almacenamiento de gaseosas y agua). Teniendo como fuentes de generación del residuo mencionado, tiendas comerciales, restaurantes, bodegas, mini market, supermercados, eventos sociales, etc.

Los encargados de recolectar y/o acopiar el PET en la ciudad de Puno está a cargo de la Asociación de Recicladores Flores, la cual es la única que cuenta con el permiso y registro legal que emite la Municipalidad Distrital de Puno. También se conoce de acopiadores informales los cuales se encuentran ubicados en la avenida Simón Bolívar, C.P. Branden y Capitán Morante del Distrito de Puno. Sin embargo, todos los acopiadores de PET tanto formales como informales de toda la región de Puno comercializan el residuo mencionado con la empresa Marvel Pachas, la cual es la única empresa en la región de Puno que distribuye el PET a las grandes empresas de la capital para su transformación. (Elaboración propia, 2018)

La Generación total de residuos sólidos ciudad de Puno según la tabla 2.8 es de 93.406 Ton/día. Y según la tabla 2.9 la cantidad de residuos de PET que se genera es 1.84%. Lo que significa que se puede obtener 1.72 Ton al día, 51.56 Ton al mes y 618.72 ton al año.

Tabla 2.10: Generación de Residuos Sólidos en la ciudad de Puno, según Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos, 2013-2018.

Generación de residuos sólidos en la ciudad de Puno (100%)	93.41 Ton/día	2802.18 Ton/mes	33626.16 Ton/año
Generación de residuos sólidos, plástico tipo 1-PET (1.84%)	1.72 Ton/día	51.56 Ton/mes	618.72 Ton/año

Fuente: (Comisión Ambiental Municipal CAM-Municipalidad Provincial de Puno, 2013-2018)

Sin embargo, para saber la condición actual y real de la cantidad de PET que se recicla, se hizo una encuesta a las micro empresas recicladoras del Distrito de Puno. Las cuales como se mencionó líneas arriba pertenecen a la Asociación de Recicladores Flores, los que indicaron que se acopia alrededor de 2 ton/semana aproximadamente. Cabe recalcar que esta encuesta fue solo realizada a recicladores formales de la ciudad de Puno, mas no informales que definitivamente aumentan la cantidad de PET.

2.6.6.5 Análisis de disponibilidad de desechos de PET en proyectos viales.

Según el Manual de Carreteras DG-2018, el número de carriles de cada calzada se fijará de acuerdo con las previsiones y composición del tráfico, acorde al IMDA de diseño, así como del nivel de servicio deseado. Los anchos de carril que se usen serán:

- 3.00 m (IMDA menor a 200 veh/día.)
- 3.30 m (IMDA entre 2000 y 400 veh/día e IMDA menores a 400 veh/día)
- 3.60 m (IMDA mayor a 6000 veh/día, IMDA entre 6000 y 4001 veh/día e IMDA entre 4000 y 2001 veh/día).

La Tabla 2.10 muestra que para un año de reciclaje de PET se puede obtener aproximadamente 619 ton. Y según el anexo C (Análisis de costo unitario con la estabilización de residuo de PET), la cantidad de PET por metro cuadrado requerido es 5.99 kg. Por consiguiente, se tiene:

$$1 m^2 \longrightarrow 5.99 kg$$

$$X m^2 \longrightarrow 618720 kg$$

$$X m^2 = 103292.38 m^2$$

Tomando como referencia los criterios de diseño de la DG-2018, se tomará un ancho mínimo de calzada de 3.6 m para un área de 103292.38 m² por consiguiente, la sección de la carretera quedará de la siguiente forma:

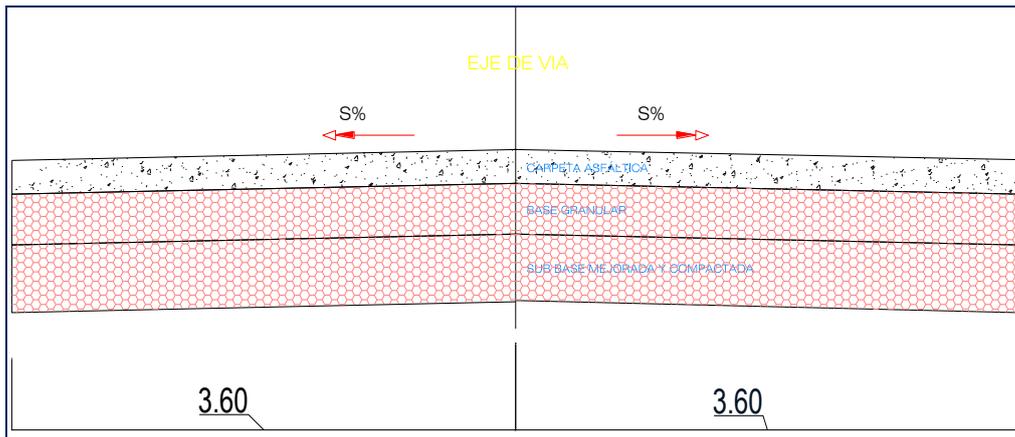


Figura 2.28: Sección de pavimento flexible, tomado para el análisis de disponibilidad de PET.

Fuente: Elaboración propia, 2018.

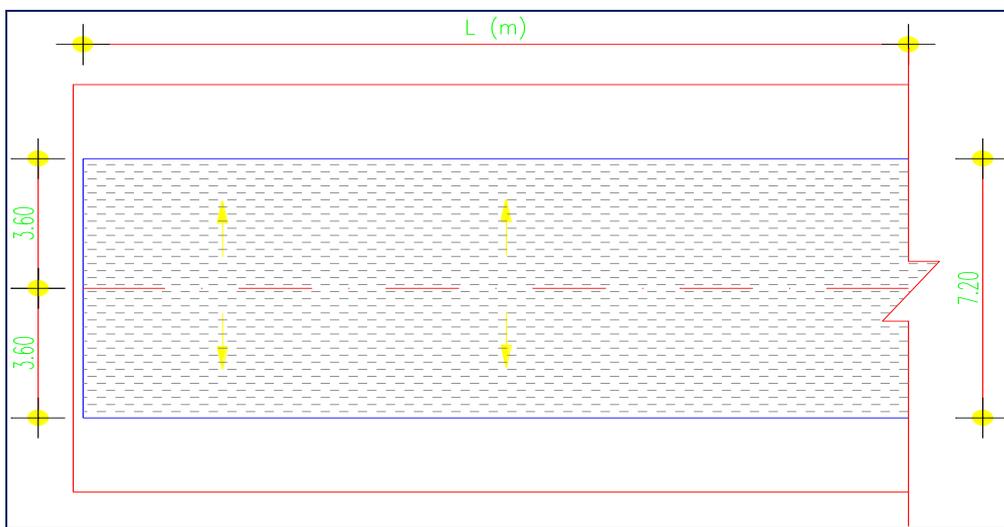


Figura 2.29: Vista en planta de pavimento, tomado para el análisis de disponibilidad de PET.

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Donde:

$$L = 14346.16 \text{ m}$$

$$L = 14.35 \text{ Km}$$

Conclusión: Con la cantidad de residuo de PET que se puede reciclar al año, se puede ejecutar tramos de 14.35 km de longitud de carretera. Además de ello se sabe que en la construcción de una carretera no el total de la longitud se encuentra material defectuoso, pudiéndose encontrar distintos tipos de suelo con diferentes características geotécnicas tanto buenas y malas. Por lo que con la presente investigación se pretende actuar solamente sobre aquellos tramos con suelos defectuosos.

2.6.6.6 Comercialización de residuos de PET en el distrito de Puno.

Las siguientes tablas muestran detalles de precios, en cuanto se ha estado comercializando los desechos de plástico PET.

Tabla 2.11: Precios referenciales de Residuos Sólidos Reaprovechables (No incluye IGV)

DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO 2011 (S/.)	PRECIO UNITARIO 2012 (S/.)
Residuos de Cartón	Lima Metropolitana	Tonelada	250	300
Residuos de plástico no PET	Lima Metropolitana	Tonelada	750	1600
Residuos de plástico PET	Lima Metropolitana	Tonelada	1000	1400
Papel blanco	Lima Metropolitana	Tonelada	1000	800
Chatarra de Hierro - Liviano	Lima Metropolitana	Tonelada	600	610
Chatarra de Hierro - Pesada	Lima Metropolitana	Tonelada	700	670
Chatarra de Cobre	Lima Metropolitana	Tonelada	20000	16835
Chatarra de Aluminio	Lima Metropolitana	Tonelada	4000	2500
Batería agotada	Drenada (sin ácido)	Tonelada	17400	21000
Llantas usadas	Lima Metropolitana	Unidad	6	14

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012)

EPS-RS, centros de acopio de residuos reciclables en Lima Metropolitana

Tabla 2.12: Valorización de los residuos sólidos reaprovechables de la Municipalidad Provincial de Puno.

CANASTA DE PRECIOS PARA EL 2016-2018.			
N°	Tipo	Soles/Kg.	Soles/Ton.
1	Papel blanco tipo bond	0.50	500.00
2	Papel de color	0.10	100.00
3	Papel periódico	0.00	0.00
4	Cartón	0.10	100.00
5	PET Botellas plásticas transparentes	0.50	500.00

6	PET Botellas plásticas opacas y de color	0.00	0.00
7	Plástico Duro 3	0.40	400.00
8	Bolsas plásticas	0.00	0.00
9	Plásticos en general	0.00	0.00
10	Botellas y envases de vidrio	0.40	400.00
11	Latas y tapas de lata	0.00	0.00
12	Aluminio	0.00	0.00
13	Metales (Fe)	0.20	200.00

Fuente: (Gerencia de Medio Ambiente Y Servicios-Municipalidad Provincial de Puno, 2016)

De la misma forma se realizó visitas a diez micro empresas que acopian, reciclan y comercializan botellas de plástico (PET). Las cuales se ubican en la ciudad de Puno. Las mencionadas micro empresas indican pertenecer a la “Asociación de Recicladores Flores”. Cabe resaltar que dicha asociación es la única registrada por la municipalidad provincial de Puno y autorizada para el reciclaje de PET.

La Asociación de Recicladores Flores cuenta con el Sr. Rogelio Flores Valdivia como su presidente y con la Sra. María Luzgarda Cutipa Flores como la representante legal, identificado con DNI 70308455. Los cuales indican que el precio de compra y venta de PET establecido por el municipio es de 0.50 soles/Kg. Lo cual afirmarían el precio actualizado al año 2018 del PET mencionado en la tabla 2.11. Sin embargo, este precio no es aplicable todos los meses del año, puesto que la demanda y oferta del PET varía. Siendo los precios promedios los siguientes:

- Compra de PET: 1.00 soles /Kg.
- Venta de PET: 1.30 soles/Kg.

La Asociación de Recicladores Flores se dedican a reciclar y acopiar los residuos sólidos de la especialidad “plásticos” comercializándolo a la empresa “Marvel Pacha” ubicada en la ciudad de Juliaca, siendo esta la única empresa de la Región encargada de la distribución del plástico reciclado a las ciudades de Arequipa y Lima, lugares donde se realiza su transformación. (elaboración propia,2018)



Figura 2.30: Almacenamiento de PET de la empresa de reciclaje “Marvel Pacha” ubicado en la Ciudad de Juliaca.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

2.6.7 Ventajas Ambientales del reciclado de PET

El consumo responsable es uno de los aspectos trascendentes que contribuyen en gran medida al paradigma del desarrollo sustentable, impulsado por números organismos internacionales, notablemente el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Para que exista una tendencia global hacia el modelo propuesto de desarrollo sustentable, es indispensable que en el mismo participe toda la cadena producción-consumo manejo-posconsumo. Lo cual abarca desde la extracción de las materias primas, los procesos intermedios, la máxima incorporación posible de materiales reciclados en el producto final, la minimización de residuos industriales y domiciliarios; y la reutilización de los residuos. Este es el fundamento de la llamada Estrategia de las 3 “R”, que simbolizan las palabras: Reducir, Reutilizar y Reciclar.

Desde el punto de vista ambiental, es la resina que presenta mayores aptitudes para el reciclado. El principal destino de esta materia prima posconsumo es la fabricación de fibras textiles, utilizándose en la confección de alfombras, cuerdas, cepillos, escobas, sunchos, telas para prendas de vestir, calzados, camisetas, etc. El PET reciclado no se destina a nuevos envases para bebidas o alimentos en contacto permanente. Otras ventajas ambientales de esta resina es la reducción drástica de la energía utilizada en el transporte, la simpleza de procedimientos y las relativamente bajas temperaturas a las cuales debe ser sometido el PET para ser transformado en nuevos productos reciclables. (Sherwell Betancourt, 2014)

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio tiene como tipo y nivel de investigación **“Básica-Experimental”** y **“Correlacional”** respectivamente, puesto que se realizará los ensayos necesarios para lograr los objetivos de la investigación en el laboratorio de Mecánica de suelos y Laboratorio de Pavimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano. Combinando el Tereftalato de Polietileno con suelo fino común del distrito de Puno. En la investigación se manipulará el residuo de tereftalato de polietileno (variable independiente) en incrementos progresivos hasta lograr mejoras en las propiedades mecánicas del suelo (variable dependiente) con respecto a su estado natural.

3.2 ÁMBITO DE ESTUDIO

3.2.1 Ubicación de la muestra

El estudio realizado se encuentra en la Región de Puno provincia de Puno. El estudio está referido a suelos finos, suelo fino A-4(0) según AASHTO y suelo arena arcillosa (SC) según SUCS. Sin embargo, en la presente investigación por ser un estudio enfocado a vías terrestres se utiliza la clasificación AASHTO según normativa ASTM D 3282 la cual recomienda su utilización para la clasificación de suelos para propósitos de construcción de carreteras, tal como se explicó en el marco teórico.

La zona a investigar es la cantera **“Salcedo”** ubicado en el centro poblado de Salcedo, Distrito de Puno, Provincia de Puno, Región Puno, a una altitud de 3840 msnm latitud sur 15° 52' 19.92" longitud Oeste 70° 0'3.35" a un costado de la Avenida industrial, la precipitación promedio anual es menor a 700mm, temperatura variable con oscilaciones entre una temperatura promedio máxima de 22°C y una mínima de 1.4°C. la zona presenta la presencia del TECMIN la cual es una organización dedica a la formación de técnicos profesionales en especialidades técnicas dirigido al sector minero e industrial.

3.2.2 Población y Muestra

La población de la investigación está constituida por material obtenido de la cantera Salcedo que es el material que predomina en la zona, es por eso que se seleccionó de este lugar.

La muestra del estudio está constituida por suelos finos, este material se obtuvo de la cantera Salcedo, para la extracción de las muestras de suelo se determinó a criterio del investigador. Se tomó en cuenta 04 puntos de muestreo a una profundidad de 1.70 m, los cuales corresponden a un suelo homogéneo, el cual a partir de los índices de plasticidad y la granulometría se clasificó como arena arcillosa SC. Las muestras de suelo extraídas han sido preparadas teniendo en consideración la NTP y el Manual de ensayos de materiales del MTC.

3.3 MATERIALES

3.3.1 Tereftalato de Polietileno (PET)

En la región de Puno, existen varias empresas dedicadas al rubro de reciclaje de productos plásticos en general. Dentro de estas, se encuentra la empresa RESITEC DEL SUR E.I.R.L., dedicada al reciclado de diferentes variedades de plásticos y de propiedad del Sr. Iván Zarate Mamani. El cual fue el responsable de proporcionarnos el agente estabilizador a utilizar (PET). En las siguientes figuras se muestra lo que fue la obtención y procesamiento del PET.



Figura 3.1: Depósito, Almacén y planta de reciclaje de gran variedad de Plásticos, ubicado en la ciudad de Juliaca.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.2: Acumulación de plástico del tipo 1 (Tereftalato de Polietileno-PET), comúnmente conocido como botellas de plástico.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

Inicialmente se decidió obtener el estabilizador a utilizar por medios propios, se comenzó recolectando plástico del tipo PET, en su totalidad el mencionado plástico se encuentra en los contenedores y basureros instalados por la Municipalidad Provincial de Puno y la Universidad Nacional del Altiplano.



Figura 3.3: Contenedor de PET ubicado en la Universidad Nacional del Altiplano Puno.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

Se logró obtener grandes cantidades de PET, recolectadas de contenedores, basureros, restaurantes, etc. Seguidamente se procedió a cortar y utilizar la parte central de las botellas y posterior a ello triturarlas con un perforador y lograr el tamaño requerido. (Pasante la malla N° 4 y retenido en la malla N° 10). Sin embargo, no se logró obtener las cantidades necesarias para realizar la totalidad de los ensayos propuestos en la

investigación, motivo por el cual se tuvo que industrializar este proceso de picado de botellas de plástico y contratar los servicios de la empresa mencionada anteriormente RESITEC DEL SUR E.I.R.L. Las siguientes figuras muestran lo mencionado en el párrafo presente y el tratamiento que se le dio al PET obtenido antes de ser utilizado en laboratorio.



Figura 3.4: PET cortado listo para su picado

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.5: PET picado al tamaño requerido (4.5 mm aproximadamente).

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.6: PET picado en sus condiciones iniciales, elaborado por la empresa RESITEC.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.7: Lavado de PET, retiro de etiquetas y demás contaminantes del plástico.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.8: Escurrimiento y proceso de secado de PET después del lavado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.9: PET lavado secado y listo para su uso en laboratorio.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.10: Tamizado del PET por la malla N°4 y N°10.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.11: PET final tamizado pasante malla N°4 y retenido malla N°10.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.3.1.1 Propiedades y especificaciones técnicas de PET.

“Industrias JQ Plásticos de Ingeniería” nos muestra la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Especificaciones Técnicas de Tereftalato de Polietileno.

PROPIEDADES				
MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECIFICO	gr/cm ³	D-792	53479	1.39
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	Kg/cm ²	D-638	53455	900 / --
RES. A LA COMPRESION (1 Y 2 % DEF)	Kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm ²	D-790	53452	1450
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	> 50
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	15
MODULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm ²	D-638	53457	37000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	85 - 87
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		--
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0.20
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BUENA
PROPIEDADES TERMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
CALOR ESPECIFICO	Kcal/Kg.°C	C-351		0.25
TEMP. DE FLEXION B/CARGA (18.5Kg/cm ²)	°C	D-648	53461	75
TEMP. DE USO CONTINUO EN AIRE	°C			-20 a 110
TEMP. DE FUSION	°C			255
COEF. DE DILATACION LINEAL DE 23 A 100°C	por °C	D-696	52752	0.00008
COEF. DE CONDUCCION TERMICA	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25

PROPIEDADES	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
ELECTRICAS				
CONSTANTE DIELECTRICA A 60 HZ		D-150	53483	3,4
CONSTANTE DIELECTRICA A 1 KHZ		D-150	53483	3,3
CONSTANTE DIELECTRICA A 1 MHZ		D-150	53483	3,2
ABSORCION DE HUMEDAD AL AIRE	%	D-570	53472	0,25
RESISTENCIA SUPERFICIAL	Ohm	D-257	53482	> 10 a la 14
RESISTENCIA VOLUMETRICA	Ohms-cm	D-257	53482	> 10 a la 15
RIGIDEZ DIELECTRICA	Kv/mm	D-149		22
PROPIEDADES QUIMICAS		OBSERVACIONES		
RESISTENCIA A HIDROCARBUROS				BUENA
RESISTENCIA A ACIDOS DEBILES A TEMP. AMBIENTE				BUENA
RESISTENCIA A ALCALIS DEBILES A TEMP. AMBIENTE				BUENA
RESISTENCIA A PROD. QUIMICOS DEFINIDOS				CONSULTAR
EFECTO DE LOS RAYOS SOLARES				ALGO LO AFECTAN
APROBADO PARA CONTACTO CON ALIMENTOS				SI
COMPORTAMIENTO A LA COMBUSTION				ARDE CON MEDIANA DIFICULTAD
PROPAGACION DE LLAMA				MANTIENE LA LLAMA
COMPORTAMIENTO AL QUEMARLO				GOTEA
COLOR DE LA LLAMA				AMARILLO ANARANJADO TIZNADO
OLOR AL QUEMARLO				AROMATICO DULCE

(Recuperado de <http://www.jq.com.ar/imagenes/productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>)

3.3.2 Material de cantera

3.3.2.1 Cantera Salcedo

- Ubicación. - Centro poblado de Salcedo, Provincia de Puno, Departamento de Puno, a una altitud de 3840 msnm latitud sur 15° 52' 19.92" longitud Oeste 70°

0'3.35" a un costado de la Avenida industrial, ubicándose al pie y en ladera del cerro Pitiquilla.

- Acceso. - El acceso es tomando la Avenida del Estudiante (pavimentada) hasta la zona que comprende ESSALUD, girar y recorrer 1 Km aproximadamente (afirmado).
- Situación Legal. - Esta cantera es propiedad de la Municipalidad del centro poblado de Salcedo-Puno.



Figura 3.12: Mapa de acceso a la cantera de Salcedo.

Fuente: <https://www.google.com.pe/maps>



Figura 3.13: Ubicación de la extracción de la muestra.

Fuente: <https://www.google.com.pe/maps>

3.3.2.2 Cantidad de muestra extraída de cantera

Tabla 3.2: Cantidad de muestra extraída para la realización de ensayos de laboratorio.

CANTERA “SALCEDO”			
ENSAYO	CANTIDAD (Kg/ensayo)	Nº de ensayos (Und)	Total (Kg)
CONTENIDO DE HUMEDAD	1	1	1
LIMITES DE CONSISTENCIA	2	1	2
GRANULOMETRIA	5	1	5
ENSAYO DE PROCTOR	25	6	150
ENSAYO DE CBR	20	18	360
TOTAL	53	27	518

Nota: Se realizó 3 ensayos de CBR por cada porcentaje de PET propuesto, para así tener mayor certeza de los resultados obtenidos.

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Equipos de laboratorio

Como se mencionó en líneas superiores la totalidad de los ensayos realizados para lograr los objetivos del presente estudio de investigación, fueron realizados en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano. Los laboratorios utilizados fueron “Laboratorio de Mecánica de Suelos” y “Laboratorio de Pavimentos”, los cuales cuentan con todos los equipos y herramientas necesarias para realizar una investigación científica. Los ensayos realizados fueron los siguiente:

3.3.3.1 Contenido de humedad

Para el mencionado ensayo se utilizó los siguientes equipos:

- Recipientes metálicos (modelo 1059512, marca OXO, sin número de serie, procedencia USA)
- Bandejas metálicas (modelo GAPPER, marca GAPPER, sin número de serie, procedencia Perú)
- Cucharon metálico de laboratorio (modelo K-0047, marca TORREY, sin número de serie, procedencia México)
- Balanza de precisión (modelo LBA 1200, marca LIGHTEVER, sin número de serie, procedencia China)
- Horno (modelo Binder, marca BINDER, sin número de serie, procedencia Alemania).

3.3.3.2 Límites de consistencia

Para el mencionado ensayo se utilizó los siguientes equipos:

- Espátula de laboratorio (modelo 7201, marca KASALAB, sin número de serie, procedencia Colombia)
- Ranurador metálico (modelo AASHTO, marca ELE INTERNATIONAL, número de serie 060611, procedencia USA)
- Cuchara de Casa Grande (modelo 24-0435, marca ELE INTERNATIONAL, número de serie 060611, procedencia USA)
- Piseta (modelo PL 0311, marca NORCES, sin número de serie y procedencia Brasil)
- Malla N°40 (modelo 8", marca ELE INTERNATIONAL, sin número de serie, procedencia USA)
- Balanza de precisión (modelo LBA 1200, marca LIGHTEVER, sin número de serie, procedencia China)
- Horno (modelo Binder, marca BINDER, sin número de serie, procedencia Alemania).
- Comba de goma (modelo 16 oz, marca Truper, sin número de serie, procedencia México).
- Vidrio esmerilado (sin N° de modelo, marca TEMPLADO S.A, sin número de serie, procedencia Perú)

- Recipientes metálicos (modelo 1059512, marca OXO, sin número de serie, procedencia USA)

3.3.3.3 Granulometría

Para el mencionado ensayo se utilizó los siguientes equipos:

- Balanza de precisión (modelo LBA 1200, marca LIGHTEVER, sin número de serie, procedencia China)
- Horno (modelo Binder, marca BINDER, sin número de serie, procedencia Alemania).
- Bandejas metálicas (modelo GAPPER, marca GAPPER, sin número de serie, procedencia Perú)
- Juego de Tamices (modelo 8", marca ELE INTERNATIONAL, sin número de serie, procedencia USA)

3.3.3.4 Ensayo de Proctor Modificado

Para el mencionado ensayo se utilizó los siguientes equipos:

- Bandejas metálicas (modelo GAPPER, marca GAPPER, sin número de serie, procedencia Perú)
- Juego de Tamices (modelo 8", marca ELE INTERNATIONAL, sin número de serie, procedencia USA)
- Molde de Compactación Proctor de 6" de diámetro (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)
- Probetas graduadas de vidrio (modelo 16340005, marca LABOLAN, sin número de serie, procedencia España)
- Cucharón metálico de laboratorio (modelo K-0047, marca TORREY, sin número de serie, procedencia México)
- Recipientes metálicos (modelo 1059512, marca OXO, sin número de serie, procedencia USA)
- Vernier (modelo Convencional, marca UYUSTOOLS, sin número de serie, procedencia USA)
- Martillo compactador Proctor Modificado (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)

- Balanza de precisión (modelo LBA 1200, marca LIGHTEVER, sin número de serie, procedencia China)
- Balanza electrónica de 30 kg (modelo EB-30, marca OHAUS, sin número de serie, procedencia China)
- Comba de goma (modelo 16 oz, marca Truper, sin número de serie, procedencia México).
- Horno (modelo Binder, marca BINDER, sin número de serie, procedencia Alemania).
- Regla enrazadora (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)

3.3.3.5 Ensayo de CBR

Para el mencionado ensayo se utilizó los siguientes equipos:

- Bandejas metálicas (modelo GAPPER, marca GAPPER, sin número de serie, procedencia Perú)
- Juego de Tamices (modelo 8", marca ELE INTERNATIONAL, sin número de serie, procedencia USA)
- Molde CBR de 6" de diámetro (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)
- Probetas graduadas de vidrio (modelo 16340005, marca LABOLAN, sin número de serie, procedencia España)
- Cucharon metálico de laboratorio (modelo K-0047, marca TORREY, sin número de serie, procedencia México)
- Recipientes metálicos (modelo 1059512, marca OXO, sin número de serie, procedencia USA)
- Vernier (modelo Convencional, marca UYUSTOOLS, sin número de serie, procedencia USA)
- Martillo compactador Proctor Modificado (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)
- Balanza de precisión (modelo LBA 1200, marca LIGHTEVER, sin número de serie, procedencia China)

- Balanza electrónica de 30 kg (modelo EB-30, marca OHAUS, sin número de serie, procedencia China)
- Comba de goma (modelo 16 oz, marca Truper, sin número de serie, procedencia México).
- Horno (modelo Binder, marca BINDER, sin número de serie, procedencia Alemania).
- Regla enrazadora (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)
- Disco Espaciador (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)
- Trípode (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)
- Placa de Aumento de Volumen ó vástago (modelo s/n, marca ORION, sin número de serie, procedencia Perú)
- Deformímetro (modelo s/n, marca ELE INTERNATIONAL, sin número de serie, procedencia USA)
- Prensa Manual para CBR (modelo CN-474M, marca ELE INTERNATIONAL, sin número de serie, procedencia USA)

3.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología seguida para la presente investigación se presenta según objetivos específicos de la investigación, los cuales están referidas a las características iniciales del suelo en estudio (grupo de control) y el efecto de la adición de Tereftalato de Polietileno en los parámetros de resistencia de suelos finos del distrito de Puno.

3.4.1 Para la obtención del grupo control

Para la obtención del grupo control se requiere conocer de las características iniciales de la muestra.

- Se realiza un estudio de alcance descriptivo para identificar las características granulométricas y de plasticidad del suelo en estudio.
- El material utilizado es un suelo fino A-4(0).
- Los ensayos realizados para tal fin fueron: Análisis Granulométrico y Límites de Consistencia.

3.4.2 Para determinar el efecto de la adición de Tereftalato de Polietileno en los parámetros de resistencia de suelos finos.

Se presenta un estudio del tipo y nivel de investigación “*Básica-Experimental*” y “*Correlacional*” respectivamente, entre la adición de PET y los factores físicos del suelo. El estadígrafo utilizado es el coeficiente de correlación de Pearson y de Spearman según sea el caso.

- Los materiales y/o insumos utilizados fueron el suelo y el Tereftalato de Polietileno. El PET en la mezcla de suelo se utilizó en proporciones de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% y 10% del peso seco de la muestra.
- Los ensayos realizados para tal fin fueron: Proctor Modificado y CBR.

Los factores mecánicos del suelo se presentan en indicadores como la densidad seca máxima (gr/cm³) y el número CBR. Para los cuales se tiene la ficha de observación de recolección de datos en cada ensayo.

3.4.3 Trabajo de campo in situ.

- Salida de campo y reconocimiento del lugar de estudio para la extracción de muestras. Se realizó 04 calicatas en diferentes puntos de la cantera.



Figura 3.14: Reconocimiento de cantera a explotar. (Cantera Salcedo)

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.15: Muestreo de Cantera Salcedo a 1.70m de profundidad.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

- La toma de muestras se realizó a una profundidad de 1.70 m a criterio del investigador, encontrándose material no alterado en esta zona.



Figura 3.16: Extracción de material de cantera. (Calicata N°1)

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.17: *Excavación y extracción de material con retroexcavadora. (Calicata N°1-2-3-4)*

Fuente: *(Elaboración Propia, 2018)*



Figura 3.18: *Carguío de material extraído para realización de ensayos en laboratorio.*

Fuente: *(Elaboración Propia, 2018)*

- Preparación de las muestras del Grupo Control y del grupo experimental: Las muestras fueron secadas al sol para la realización de los ensayos.



Figura 3.19: Material extraído de cantera Salcedo, 30 sacos de 25Kg c/u.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.20: Disgregación de material de cantera con comba de goma.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.21: Secado de material de cantera para pruebas de laboratorio.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.4.4 Trabajo de Laboratorio.

Una vez extraídas y preparadas las muestras para el grupo de control y para el grupo experimental, el siguiente paso fue remitirlas al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, para realizar los respectivos ensayos de laboratorio.

Cada uno de estos ensayos se realizó de acuerdo a las especificaciones que regulan las normas, como las establecidas por la American Society for Testing Materials (ASTM) de los Estados Unidos de América, normas del MTC Manual de Ensayo de Materiales (EM 2000) y la Norma Técnica Peruana (NTP). Los ensayos realizados son los siguientes:

➤ **Ensayos estándar**

- Contenido de Humedad MTC E- 108-2000.
- Análisis Granulométrico por Tamizado ASTM D-422, MTC E107.
- Límite Líquido ASTM D-4318, MTC E110.
- Límite Plástico ASTM D-4318, MTC E111.
- Clasificación SUCS ASTM D-2487.
- Clasificación de Suelos AASHTO M-145, ASTM D-3282.

➤ **Ensayos Especiales**

- Proctor Modificado ASTM D-1557, MTC-E115.
- California Bearing Ratio (CBR) ASTM D-1883, MTC E132.

3.4.4.1 Generalidades del ensayo Valor Relativo de Soporte (CBR)

Ensayo conocido como CBR, que son las iniciales en inglés (California Bearing Ratio) del método empírico desarrollado por los ingenieros T. E. Staton y O. J. Porter del Departamento de Carreteras de California para determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, bajo condiciones de densidad y humedad cuidadosamente controladas. Se expresa en porcentaje como la razón de la carga unitaria que se requiere para introducir un pistón dentro del suelo, a la carga unitaria para introducir el mismo pistón a la misma profundidad en una muestra tipo (patrón) de piedra triturada. (Quispe Supo, 2014)

El CBR para humedad óptima es la más popular y es conocida también como «CBR de tres puntos». Consiste en elaborar tres especímenes compactando el suelo con energías de compactación de 12, 25 y 56 golpes por capa.

Sin embargo, el ensayo CBR permite aplicar varias normativas (ASTM, UNE, NLT y las normas Mexicana, Chilena, Colombiana y Peruana). Aunque los cálculos que se realizan son básicamente los mismos, existen algunas diferencias. Las normas actualmente disponibles para el ensayo CBR son estas:

- NLT 111/87 (Norma Española antigua).
- UNE 103.502:1995 (Norma Europea actual).
- ASTM D1883-07 (Norma U.S.A. "original").
- M-MMP-1-11-08 (Norma Mexicana).
- INV E-148-07 (Norma Colombiana).
- NCh1852.Of81 (Norma Chilena).
- MTC E 132 (Norma Peruana).

La diferencia más significativa es pues la energía de compactación (número de golpes), a continuación, se presenta una tabla indicando las diferencias.

Tabla 3.3: Número de golpes de compactación en las normas actualmente disponibles para el ensayo CBR

NORMA	NÚMERO DE GOLPES DE COMPACTACIÓN PARA ENSAYO CBR		
NLT 111/87 (Norma Española antigua)	15	30	60
UNE 103.502:1995 (Norma Europea actual)	15	30	60
ASTM D1883-07 (Norma U.S.A. "Norma de origen")	10	25	56
NCh1852. (Norma Chilena)	10	25	56

INV E-148-07 (Norma Colombiana)	10	25	56
M-MMP-1-11-08 (Norma Mexicana)	10	25	56
MTC E 132 (Norma Peruana)	12	26	55

Fuente: (Quispe Supo, 2014)

En la norma ASTM y, en general, en todas las normas americanas, el número de golpes no es totalmente fijo y se permite usar más o menos golpes si vemos que no conseguimos alcanzar la densidad máxima Proctor, que al fin y al cabo es el objetivo final de darle todos estos golpes.

Para determinar el rango del número de golpes de compactación se toma en cuenta Valores críticos por ejemplo para el número de golpes de 56, 25 y 12 golpes la explicación es la siguiente:

- 56 golpes compactación: Depende mucho del número de golpes de compactación que se realizó en el ensayo de Proctor Modificado, este número de golpes será el extremo máximo.
- 12 golpes de compactación: Este número de golpes se realiza puesto que no es fácil obtener suelos compactados ya sea con 9 o 10 golpes de compactación por capa, ya que, al momento de realizar el ensayo, este se deshace, por tanto, para obtener una muestra compactada sin que pueda deshacerse se toma como mínimo 12 golpes de compactación. Por lo que este también sería el extremo mínimo, ojo esto puede variar dependiendo del laboratorista, las condiciones del lugar donde se realiza el ensayo y la energía de compactación.
- 25 golpes de compactación: Se toma aproximadamente la mitad del número de golpes de los extremos mínimo y máximo (para este caso 56 y 12 golpes de compactación).

Finalmente, el objetivo del ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo cortante por punzonado de los suelos. Dicha resistencia para las mismas condiciones de densidad y humedad obtenidas en el ensayo Proctor modificado, el CBR se expresa como:

$$CBR = \frac{\text{presión ejercida por el pistón sobre el suelo en estudio}}{\text{presión correspondiente a la misma penetración en una muestra patrón}} * 100$$

El procedimiento realizado para los ensayos del grupo de control (GC) y del grupo experimental (GE) se detalla a continuación.

3.4.4.2 Contenido de Humedad

El objetivo del ensayo es determinar el contenido de humedad de un suelo. El cual está dado por una relación, expresada como porcentaje, del peso de agua en una masa dada de suelo, al peso seco de las partículas del suelo. El mencionado ensayo se realizó solo para el grupo de control. Se muestra a continuación mediante figuras y en orden cronológico el proceso realizado.



Figura 3.22: Muestra de suelo debidamente sellado para evitar pérdida de humedad.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.23: Muestras de suelo húmedo para el ensayo (03 muestras).

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.24: Pesado de muestras de suelo en estado húmedo.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.25: Secado de muestras húmedas de suelo anteriormente pesadas en horno eléctrico durante 24 horas a 110 ± 5 °C.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.26: Pesado y registro de muestras en estado seco, después de 24 horas.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.4.4.3 Análisis Granulométrico por Tamizado

El objetivo del ensayo es determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas del suelo en estudio. El mencionado ensayo se realizó solo para el grupo de control. Se muestra a continuación mediante figuras y en orden cronológico el proceso realizado.



Figura 3.27: Cuarteo de muestra mediante cuarteador mecánico.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.28: Elección de la porción más representativa de muestra cuarteada, para posteriormente lavar la muestra elegida.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

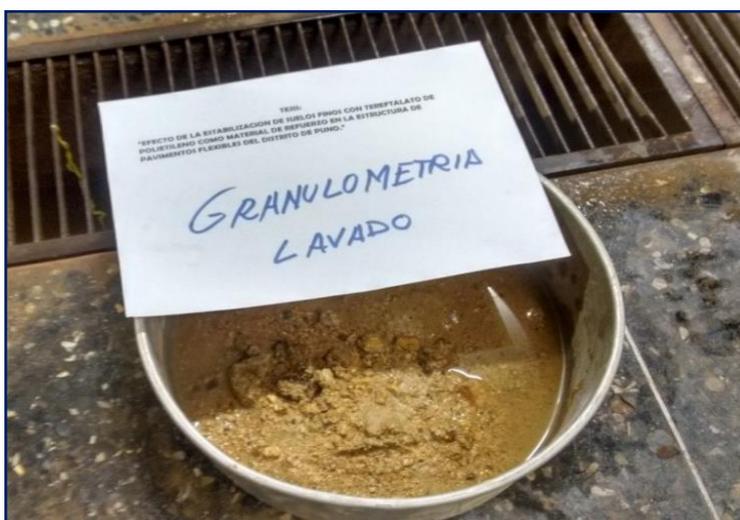


Figura 3.29: Lavado de muestra elegida utilizando el tamiz N° 200.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.30: Secado de la muestra durante 18 horas en horno eléctrico a 110°C después de su lavado, pesando y registrando ese dato antes del tamizado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.31: Juego de tamices debidamente ordenados para el ensayo de granulometría.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.32: Vertimiento de la muestra en los tamices, agitándolos enérgicamente para permitir la gradación.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.33: Pesado y registro de las porciones retenidas en cada tamiz.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

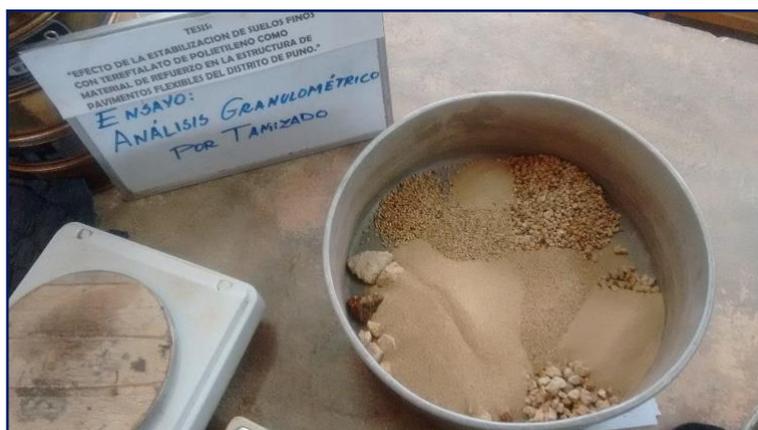


Figura 3.34: Análisis granulométrico terminado, mostrando los diferentes tamaños de partículas de la muestra en estudio.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.4.4.4 Límite Líquido

El objetivo del ensayo es determinar el contenido de humedad, expresado en porcentaje, para el cual el suelo se halla en el límite entre los estados líquido y plástico. Arbitariamente se designa como el contenido de humedad al cual el surco separador de dos mitades de una pasta de suelo se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 13 mm cuando se deja caer la copa 25 veces desde una altura de 1 cm a razón de dos caídas por segundo. El mencionado ensayo se realizó solo para el grupo de control. Se muestra a continuación mediante figuras y en orden cronológico el proceso realizado.



Figura 3.35: Tamizado por la malla N° 40 aproximadamente 250 gramos de muestra disgregada y seca.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.36: Saturación durante 24 horas del material tamizado anteriormente.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.37: Muestra saturada y expedita para realizar el ensayo de límite líquido.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.38: Cuchara de casa Grande con muestra después de N N° de golpes y surco unido.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.39: Extracción de surco de suelo que se unió después de los golpes.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.40: Secado de muestras en horno eléctrico durante 24 horas a 110°C, registrando sus pesos antes y después de su secado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.4.4.5 Límite Plástico

El objetivo del ensayo es determinar la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de suelo de unos 3,2 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre la

palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado), sin que dichas barritas se desmoronen. El mencionado ensayo se realizó solo para el grupo de control. Se muestra a continuación mediante figuras y en orden cronológico el proceso realizado.



Figura 3.41: Tamizado por la malla N°40 y saturado de muestra durante 24 hr.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.42: Porciones de muestra para formar rollitos del diámetro de la mina de lapicero aproximadamente.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.43: Formación de rollitos de material seleccionado antes de su fractura.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

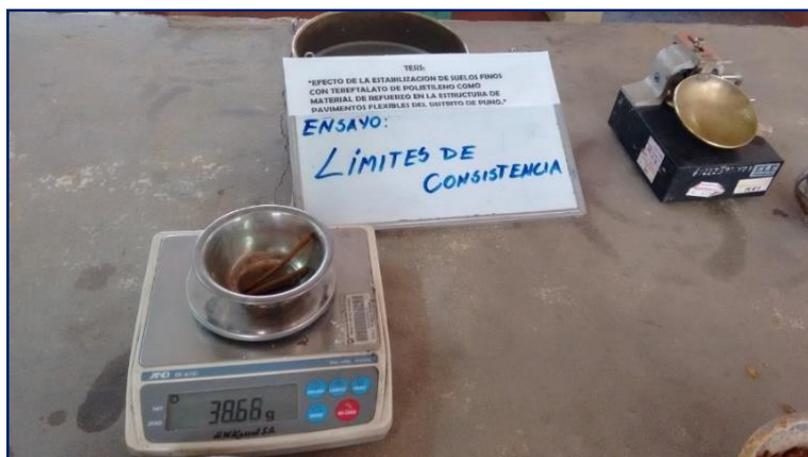


Figura 3.44: Pesado y registro de rollitos de 3.2 mm de diámetro aproximadamente.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.45: Secado de muestras en horno eléctrico durante 24 horas a 110°C, registrando sus pesos antes y después de su secado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.4.4.6 Proctor Modificado

El objetivo del ensayo es determinar la relación entre el Contenido de Agua y Densidad seca máxima de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 101,6 ó 152,4 mm (4 ó 6 pulg) de diámetro con un pisón de 44,5 N (10 lbf) que cae de una altura de 457 mm (18 pulg), produciendo una Energía de Compactación de (2700 kN-m/m³ (56000 pie-lbf/pie³)). El mencionado ensayo se realizó para el grupo de control y para el grupo experimental. Se muestra a continuación mediante figuras y en orden cronológico el proceso realizado.

- **Para el Grupo de control** (ensayos en suelo natural, sin adición de PET). Se presenta imágenes de un solo porcentaje de adición de agua, aclarando que para cada punto del ensayo (04 puntos en total) el procedimiento es el mismo.



Figura 3.46: Materiales y equipos utilizados en el ensayo Proctor modificado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.47: Material disgregado y secado a temperatura ambiente.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.48: Tamizado de muestra para elección de método de Proctor Modificado a utilizar.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.49: Tamizado de muestra después de elección de método. (5400 gr/punto aprox.)

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.50: Dosificación de material seleccionado y agua para cada punto del ensayo.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.51: Mezcla y homogenización de suelo y agua en proporciones calculadas.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.52: Material expedito para compactación con pisón a 56 golpes en 5 capas.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.53: Pisón de 44.5 N, produciendo energía de compactación de 2700 kN-m/m³.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.54: Compactación de muestra distribuida en 5 capas.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.55: Enrazado y registro de peso de molde más suelo compactado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.56: Muestra compactada y secado en horno eléctrico durante 24 horas a 110°C.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

- Para el Grupo experimental (ensayos en suelo con adición de PET en proporciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10 % del peso seco de la muestra). Se presenta imágenes de un solo porcentaje, aclarando que para cada porcentaje propuesto el procedimiento es el mismo.



Figura 3.57: Materiales, equipos e Insumos a utilizar en ensayo Proctor Modificado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.58: Tereftalato de Polietileno lavado, secado y tamizado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.59: Dosificación de PET (6% del peso seco de la muestra) del mismo modo para los demás porcentajes.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

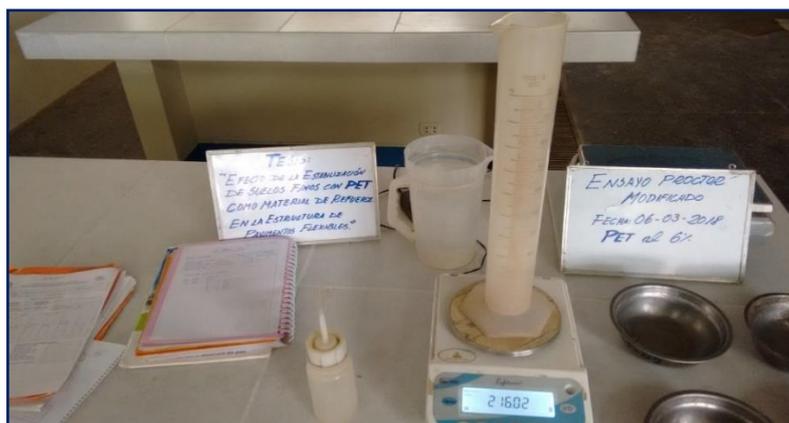


Figura 3.60: Dosificación de agua distinto para cada punto del ensayo.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.61: Insumos (agua, PET, suelo) dosificados según cálculos del investigador.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

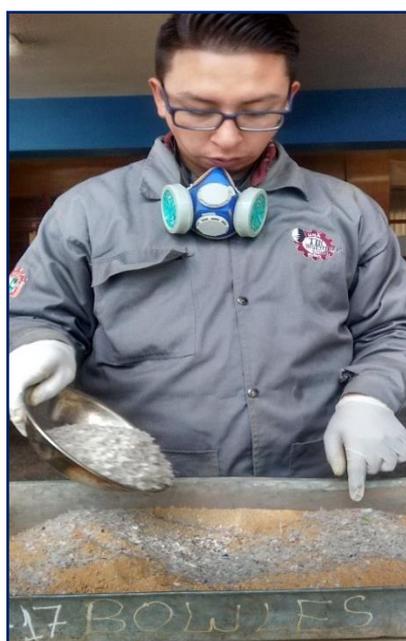


Figura 3.62: Vertimiento de PET y agua para su mezcla con suelo en las proporciones calculadas.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.63: Homogenización de mezcla de suelo, PET y agua.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.64: PET al 6% y agua al 13% del peso seco del suelo.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.65: PET al 8% y agua al 13% del peso seco del suelo.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.66: PET al 10% y agua al 13% del peso seco del suelo.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.67: Suelo, PET y agua debidamente mezclados y homogenizados.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.68: Muestra separada en 5 capas para su compactación.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.69: Compactación de la quinta capa de muestra con pisón de 44.5 N.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.70: Muestra con PET compactada a 56 golpes cada capa.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.71: Enrazado de muestra para su pesado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.72: Pesado y registro de muestra con PET compactada.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.73: Extracción de muestra con PET para su pesado y secado en horno eléctrico.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.4.4.6.1 Cálculo de la Densidad Seca Máxima y el Contenido de Humedad Óptimo en el ensayo de Próctor Modificado.

Para suelo fino al 0% de PET.

a. Densidad del Suelo Húmedo:

Altura del molde (h) = 11.63 cm (obtenido de la medición del molde con vernier)

Diámetro del molde (D) = 15.21 cm (obtenido de la medición del molde con vernier)

- **Para volumen del molde:** $\pi * \frac{D^2}{4} * h = \pi * \frac{15.21^2}{4} * 11.63 = 2113 \text{ cm}^3$
- **Para la Densidad de Suelo Húmedo**

Peso Suelo Húmedo + Molde	gr.	10342	10441	10501	10458
Peso del Molde	gr.	6031	6031	6031	6031
Peso del Suelo Húmedo	gr.	4311	4410	4470	4427
Densidad del Suelo Húmedo	gr/cc	2.04	2.09	2.12	2.09

- **Peso suelo Húmedo más Molde (obtenido del pesado después de la compactación (2)**

Molde 1= 10342 g
 Molde 2= 10441 g
 Molde 3= 10501 g
 Molde 4= 10458 g

- **Peso del Molde (obtenido del pesado del molde en balanza) (3)**

Peso Molde 1= 6031 g
 Peso Molde 2= 6031 g
 Peso Molde 3= 6031 g
 Peso Molde 4= 6031 g

- **Peso del suelo Húmedo..... (4) = (2)-(3)**

Peso del suelo Húmedo 1 = 10342-6031= 4311 g
 Peso del suelo Húmedo 2 = 10441-6031= 4410 g
 Peso del suelo Húmedo 3 = 10501-6031= 4470 g
 Peso del suelo Húmedo 4 = 10458-6031= 4427 g

- Densidad del suelo húmedo..... (5) = (4) / (1)

Densidad del suelo húmedo 1 = 4311/2113 = 2.04 g/cm³

Densidad del suelo húmedo 2 = 4410/2113 = 2.09 g/cm³

Densidad del suelo húmedo 3 = 4470/2113 = 2.12 g/cm³

Densidad del suelo húmedo 4 = 4427/2113 = 2.09 g/cm³

b. Contenido de humedad:

Nº TARA		J-02	M-3	J-03	P-08
Peso de la Tara	gr	61.11	62.93	70.88	109.20
	.				
Peso del Suelo Húmedo + Tara	gr	617.69	829.02	626.76	800.44
	.				
Peso del Suelo Seco + Tara	gr	554.64	736.24	554.95	705.92
	.				
Peso del Agua	gr	63.05	92.78	71.81	94.52
	.				
Peso del Suelo Seco	gr	493.53	673.31	484.07	596.72
	.				
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	12.78	13.78	14.83	15.84

- Peso de la tara (obtenido del pesado en balanza) (6)

J-02= 61.11 g

M-3= 62.93 g

J-03= 70.88 g

P-08= 109.20 g

- Peso de Suelo húmedo más tara (obtenido del pesado en balanza después de la compactación) (7)

J-02= 617.69 g

M-3= 829.02 g

J-03= 626.76 g

P-08= 800.44 g

- Peso de Suelo seco más tara (obtenido del pesado en balanza después de su secado en horno) (8)

J-02= 554.64 g

M-3= 736.24 g

J-03= 554.95 g

P-08= 705.92 g

- Peso de Agua (9) = (7) – (8)

J-02= 617.69 - 554.64= 63.05g

M-3= 829.02 - 736.24= 92.78g

J-03= 626.76 - 554.95= 71.81g

P-08= 800.44 - 705.92= 94.52g

- Peso del Suelo Seco (10) = (8) – (6)

J-02= 554.64 – 61.11= 493.53g

M-3= 736.24 – 62.93= 673.31g

J-03= 554.95 – 70.88= 484.07g

P-08= 705.92 – 109.20= 596.72g

- Contenido de Humedad (11) = (9) / (10) * 100

J-02= 63.05 /493.53 * 100 = 12.78 %

M-3= 92.78 /673.31 * 100 = 13.78 %

J-03= 71.81 /484.07 * 100 = 14.83 %

P-08= 94.52 /596.72 * 100 = 15.84 %

- c. **Densidad Seca:** (12) = (5) / (uno + 11/100)

J-02= 1.809 g/cm3

M-3= 1.834 g/cm3

J-03= 1.842 g/cm3

P-08= 1.809 g/cm3

Finalmente, se gráfica contenido de humedad vs densidad seca. Hallando gráficamente la Densidad Seca Máxima y el Contenido de Humedad Óptimo al 0% de PET.

NOTA: el cálculo se realiza de la misma manera para todos los demás porcentajes de PET propuestos.

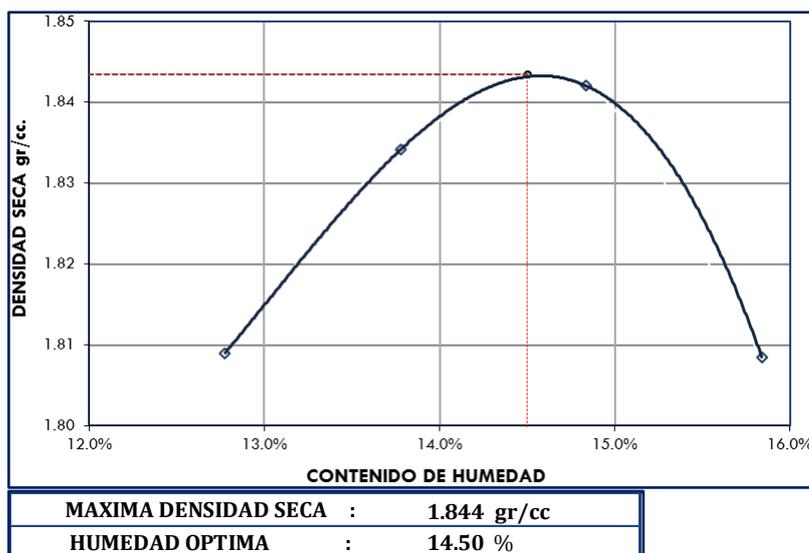


Figura 3.74: Cálculo de Densidad Seca Máxima y Contenido Óptimo de Humedad.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.4.4.7 California Bearing Ratio (CBR)

El objetivo del ensayo es determinar un índice de resistencia de los suelos, denominado valor de la relación de soporte, que es muy conocido, como CBR (California Bearing Ratio). El ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad (Proctor Modificado). El mencionado ensayo se realizó para el grupo de control y para el grupo experimental, repitiendo el ensayo en cada caso 3 veces para tener certeza de los resultados obtenidos. Se muestra a continuación mediante figuras y en orden cronológico el proceso realizado.

- **Para el Grupo de control** (ensayos en suelo natural, sin adición de PET). El procedimiento del ensayo es muy similar al del ensayo Proctor Modificado con la diferencia de que se utiliza adicionalmente otros materiales como papel filtro, disco espaciador, vástagos, trípodes y pesas. Se conforma tres moldes de 6” con distintas energías de compactación (12, 25 y 56 golpes).
- Un factor determinante para efectuar el ensayo CBR es el agua, este valor además del valor de Densidad Seca Máxima se obtiene del ensayo Proctor Modificado. El control del agua es muy importante puesto que con esta cantidad de fluido nuestro suelo en estudio se densifica óptimamente, lográndose hacer más resistente frente a diversos esfuerzos. Se muestra a continuación el cálculo realizado para la obtención de la cantidad de agua:

Una vez obtenido el contenido óptimo de humedad (cantidad de agua) tal como se muestra en ítem 3.4.4.6 Ensayo Proctor Modificado. En nuestro caso 14.50%, se procede a obtener la cantidad de agua la cual representa el 14.50% del peso seco de nuestra muestra (Suelo secado en horno a temperatura de 110+-5°C, durante 24 horas).

Tabla 3.4: Cantidad de insumos para ensayo CBR al 0% de PET.

Cantidad de suelo (g)	5500.00*
Cantidad de agua (g)	797.50**

*Nota: (*Peso seco de suelo, **14.50% de 5500.00)*

Fuente: (Elaboración propia, 2018)



Figura 3.75: Materiales y equipos utilizados en el ensayo de CBR.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.76: Papel filtro que se utiliza para cubrir la base y la superficie de la muestra dentro del molde.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.77: *Disgregación y tamizado de material para su uso en el ensayo de CBR.*

Fuente: *(Elaboración Propia, 2018)*



Figura 3.78: *Medición del diámetro, altura y peso de los moldes de CBR.*

Fuente: *(Elaboración Propia, 2018)*



Figura 3.79: *Molde CBR con disco espaciador en su base.*

Fuente: *(Elaboración Propia, 2018)*



Figura 3.80: Molde CBR con disco espaciador y papel filtro en la base.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.81: Muestra preparada con la humedad obtenida en el ensayo de Proctor.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.82: Muestra expedita para su compactación a 12, 25 y 56 golpes.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.83: Moldes CBR a 12, 25 y 56 golpes enraizados, con papel filtro en la base y parte superior del molde como también muestras para controlar la humedad propuesta.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.84: Sumergido de moldes en agua para control de su deformación durante 4 días.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.85: Moldes CBR sumergidos con sus respectivas pesas y vástagos.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.86: Muestras secas obtenidas del ensayo de CBR para control de humedad.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.87: Medición de la deformación cada 24 horas durante 4 días con deformímetro.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.88: Ecurrimiento de moldes CBR después de 4 días de sumergidos.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.89: Retiro de papel filtro para proceder a prueba en prensa manual para CBR.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.90: Colocado de molde CBR en prensa.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.91: Penetración a molde CBR de 12, 25 y 56 golpes en prensa CBR.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.92: Inicio de ensayo CBR, giro del mango de la prensa a razón de 1.27 mm/min.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.93: Registro de los esfuerzos a determinada deformación propuesto según norma.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.94: Moldes CBR ensayados con suelo en condiciones naturales, después de penetración a 1.27mm/min.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

- **Para el Grupo experimental** (ensayos en suelo con adición de PET en proporciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10% del peso seco de la muestra). El procedimiento del ensayo es muy similar al del ensayo Proctor Modificado con la diferencia de que se utiliza adicionalmente otros materiales como papel filtro, disco espaciador, vástagos, trípodes y pesas. Se conforma tres moldes de 6” con distintas energías de compactación (12, 25 y 56 golpes). Se repitió el ensayo en cada caso 3 veces para tener certeza de los resultados obtenidos. Se presenta imágenes de un solo porcentaje, aclarando que para cada porcentaje propuesto el procedimiento es el mismo.
- Como ya se mencionó en el punto anterior el agua es un factor determinante para efectuar el ensayo CBR, este valor además del valor de Densidad Seca Máxima se obtiene del ensayo Proctor Modificado. El control del agua es muy importante puesto que con esta cantidad de fluido nuestro suelo en estudio se densifica óptimamente, lográndose hacer más resistente frente a diversos esfuerzos.
- Para los ensayos de CBR realizados se utilizó como “humedad óptima” al CHO del suelo en su estado natural (14.50%), puesto que el PET al ser un tipo de plástico no absorbe agua y considerando que el suelo en estudio en su estado natural logra densificarse mejor con un CHO de 14.50%, el cual lo hace más resistente frente a diversos esfuerzos. Se muestra a continuación el cálculo realizado para la obtención de la cantidad de agua y de PET para el grupo experimental:

Una vez obtenido el contenido óptimo de humedad (cantidad de agua) tal como se muestra en ítem 3.4.4.6 Ensayo Proctor Modificado. En nuestro caso 14.5%, se procede a obtener la cantidad de agua (14.50% de peso seco de suelo) (Suelo secado en horno a temperatura de 110+-5°C, durante 24 horas) a diferentes porcentajes de PET.

Tabla 3.5: Cantidad de insumos para ensayo CBR a diferentes porcentajes de PET.

Porcentaje de PET	Cantidad de PET (g)	Cantidad de Suelo (g)*	Cantidad de Agua (g)**
0%	0.00	5500.00	797.50
2%	110.00	5500.00	797.50
4%	216.00	5400.00	783.00

6%	318.00	5300.00	768.50
8%	416.00	5200.00	754.00
10%	510.00	5100.00	739.50

*Nota: (*Pesos secos de suelo, **14.50% de pesos secos)*

Fuente: (Elaboración propia, 2018)



Figura 3.95: Materiales, equipos e insumos a utilizar en el ensayo CBR.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.96: Disgregación de material de cantera.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.97: Selección de material de cantera (Tamizado).

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.98: Suelo con agente estabilizador al 1.5% de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.99: Suelo con agente estabilizador al 2% de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.100: Suelo con agente estabilizador al 6% de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.101: Suelo con agente estabilizador al 8% de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.102: Suelo con agente estabilizador al 10% de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.103: Mezclado y homogenizado de suelo, PET y agua.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.104: Suelo, PET al 2% y agua al 14.5% mezclado y homogenizado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.105: Suelo, PET al 6% y agua al 14.5% mezclado y homogenizado.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.106: Muestra dividida en 5 capas expedita para compactación a 12, 25 y 56 golpes.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.107: Compactación de muestra con pisón de 44.5 N.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.108: Enrazado con regla metálica una vez terminado la compactación.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.109: Muestras compactados y registrados para su inmersión durante 4 días en agua.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.110: Muestras compactados a 12, 25 y 56 golpes preparados para su inmersión.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.111: Muestras obtenidas de los moldes CBR para control de su humedad.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.112: Muestras listas para ser sumergidos en pozas con agua durante 4 días.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.113: Primera lectura de la deformación de muestra compactada.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.114: Lectura con deformímetro cada 24 horas de muestras compactadas.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.115: Retiro de muestras después de 4 días de estar sumergidas.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.116: Escurrimiento de muestras sumergidas durante 15 minutos.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.117: Superficie de muestra compactada con PET lista para ser ensayada en prensa.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.118: Colocado de sobrepeso en la superficie de muestra compactada.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.119: Muestra y molde CBR en prensa manual de CBR.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.120: Funcionamiento de prensa manual a 1.27 mm/min y registro de esfuerzos.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)



Figura 3.121: Muestra con PET después de ser ensayada en prensa CBR.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

3.4.4.7.1 Cálculo de Valor Relativo de Soporte (CBR)

Para suelo fino al 0% de PET.

Teniendo el mismo criterio realizado en el ensayo de Proctor modificado se procede a hallar la densidad seca y contenido de humedad.

a) Para la densidad seca y contenido de humedad.

Peso Suelo Húmedo + Molde	gr.	11277	12161	11239
Peso del Molde	gr.	7282	7784	6711
Peso del Suelo Húmedo	gr.	3995	4377	4528
Volumen del Suelo	cc.	2125.02	2150.97	2087.74
Densidad del Suelo Húmedo	gr/cc.	1.880	2.035	2.169

*Para halla el Volumen del suelo (4) se obtuvo los siguientes datos:

Diámetro del molde = 15.22, 15.28 y 15.25 cm

Altura del molde = 17.82, 17.87 y 17.57 cm

Altura del disco espaciador = 6.14 cm

Volumen del Suelo (4) = $\pi * 15.22^2 * (17.82 - 6.14) / 4 = 2125.02 \text{ cm}^3$

Capsula	No	G-01	G-02	C-3
No				
Suelo Húmedo + Capsula	gr.	694.61	656.39	595.42
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	617.51	586.94	535.04
Peso del Agua	gr.	77.10	69.45	60.38
Peso de la Capsula	gr.	84.40	109.22	109.55
Peso del Suelo Seco	gr.	533.11	477.72	425.49
% de Humedad	%	0.14	0.15	0.14
Promedio de Humedad	%	14.46%	14.54%	14.19%
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	1.642	1.777	1.899

b) Cálculo de la Expansión

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	Expansión	
				mm	%		mm	%		mm	%
16/12/2017	02:00 p.m.	0	11.525	0	0	12.382	0	0	12.131	0	0
17/12/2017	02:00 p.m.	24	11.051	-0.474	-0.406	13.908	1.526	1.301	13.883	1.752	1.533
18/12/2017	02:00 p.m.	48	11.098	0.047	0.04	13.951	0.043	0.037	14.989	1.106	0.968
19/12/2017	02:00 p.m.	72	11.122	0.024	0.021	13.968	0.017	0.014	15.885	0.896	0.784
20/12/2017	02:00 p.m.	96	11.128	0.006	0.005	13.979	0.011	0.009	15.897	0.012	0.01

% Expansión = (Lectura inicial-Lectura final) * 100/ (altura del molde (178.2 mm) menos la altura del disco espaciador (61.4 mm), es decir, 116.8 mm de altura inicial.

% Expansión = (11.525 mm-11.128 mm) * 100/116.8mm

% Expansión =-0.34 mm (El procedimiento de cálculo es el mismo para cada caso)

c) Penetración

Penetración mm	Tiempo	Carga Est.	MOLDE No G-01				MOLDE No G-02				MOLDE No G-03			
			Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.
0.63	00:30		0.06	6.12	0.32		0.11	11.22	0.58		0.34	34.67	1.79	
1.27	01:00		0.14	14.28	0.74		0.24	24.47	1.26		1.07	109.11	5.64	
1.91	01:30		0.27	27.53	1.42		0.45	45.89	2.37		1.98	201.90	10.43	
2.54	02:00	70.31	0.48	48.95	2.53	3.62	0.78	79.54	4.11	5.91	3.00	305.91	15.81	19.81
3.81	03:00		0.88	89.73	4.64		1.54	157.03	8.12		5.34	544.52	28.14	
5.09	04:00	105.00	1.08	110.13	5.69	6.11	2.13	217.20	11.22	12.18	6.58	670.96	34.68	36.48
6.35	05:00		1.23	125.42	6.48		2.54	259.00	13.39		7.68	783.13	40.47	
7.62	06:00		1.33	135.62	7.01		2.68	273.28	14.12		8.74	891.22	46.06	
8.89	07:00		1.38	140.72	7.27		2.71	276.34	14.28		9.83	1002.37	51.80	

Análisis para una Penetración de 2.54mm

Lectura de la prensa: 0.48 KN

Convirtiendo Lectura de la Prensa: $0.48 \times 101.97 = 48.95 \text{Kg}$ (a)

Área del pistón de Penetración = 19.35cm^2 (b)

Carga unitaria del ensayo = $(a)/(b) = 48.95/19.35 = 2.53 \text{ Kg/cm}^2$

Se dibuja una curva que relacione las presiones (ordenadas) y las penetraciones (abscisas), y se observa si esta curva presenta un punto de inflexión. Si no presenta punto de inflexión se toman los valores correspondientes a 2,54 y 5,08 mm (0,1" y 0,2") de penetración. Si la curva presenta un punto de inflexión, la tangente en ese punto cortará el eje de abscisas en otro punto (o corregido), que se toma como nuevo origen para la determinación de las presiones correspondientes a 2,54 y 5,08 mm.

En nuestro caso se corrigió el origen de la curva, como se muestra en las siguientes imágenes:

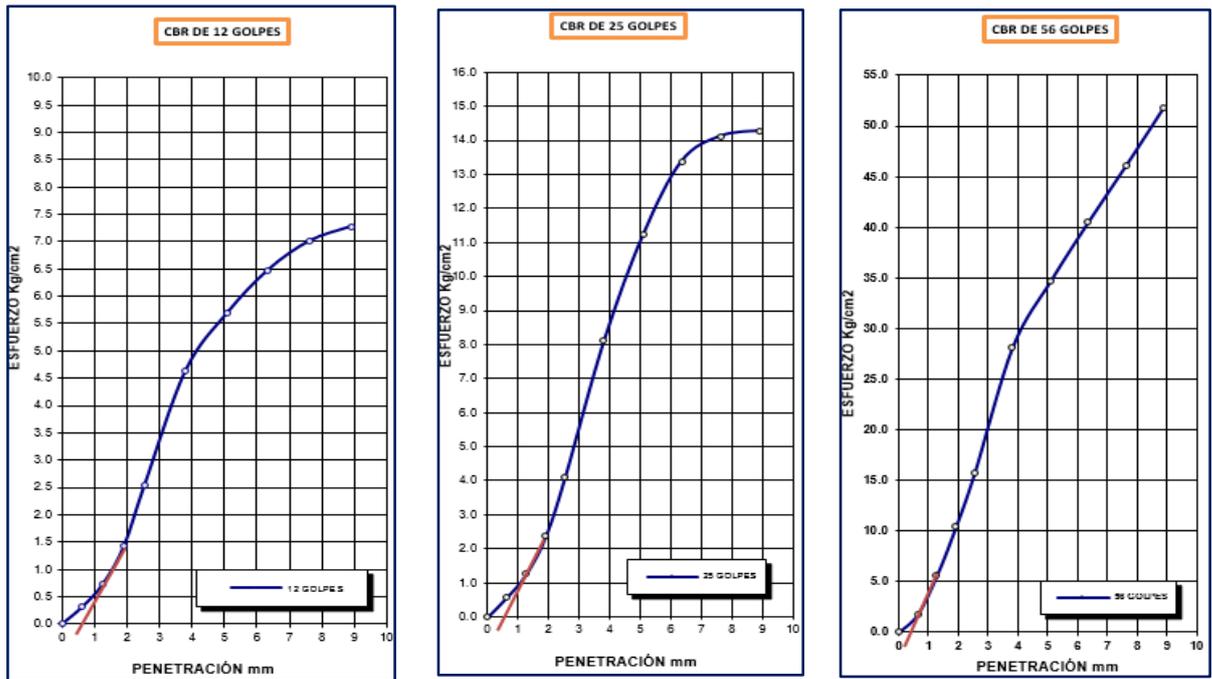


Figura 3.122: Curvas CBR corregidas a 12, 25 y 56 golpes al 0% de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Teniendo como presiones corregidas a 12, 25 y 56 golpes 3.62, 5.91 y 19.81 Kg/cm² respectivamente, entonces el índice CBR es el siguiente:

$$CBR = \frac{\text{presión ejercida por el pistón sobre el suelo en estudio}}{\text{presión correspondiente a la misma penetración en una muestra patrón}} * 100$$

Penetración		Presión		
Mm	Pulgadas	MN/m ²	kgf/cm ²	lb/plg ²
2,54	0,1	6,90	70,31	1,000
5,08	0,2	10,35	105,46	1,500

Figura 3.123: Valores de presiones de la muestra patrón en ensayo de CBR.

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

$$CBR = \frac{3.62}{70.31} * 100 = 5.15\% \text{ (Para 12 golpes de Compactación al 100\% de su DSM)}$$

$$CBR = \frac{5.91}{70.31} * 100 = 8.41\% \text{ (Para 25 golpes de Compactación al 100\% de su DSM)}$$

$$CBR = \frac{19.81}{70.31} * 100 = 28.18\% \text{ (Para 56 golpes de Compactación al 100\% de su DSM)}$$

Finalmente, para cuestiones de diseño de CBR se grafica la curva CBR – Densidad seca y se obtiene el CBR de diseño al 95% de la densidad seca o al porcentaje deseado.

NOTA: el cálculo se realiza de la misma manera para todos los demás porcentajes de PET propuestos.

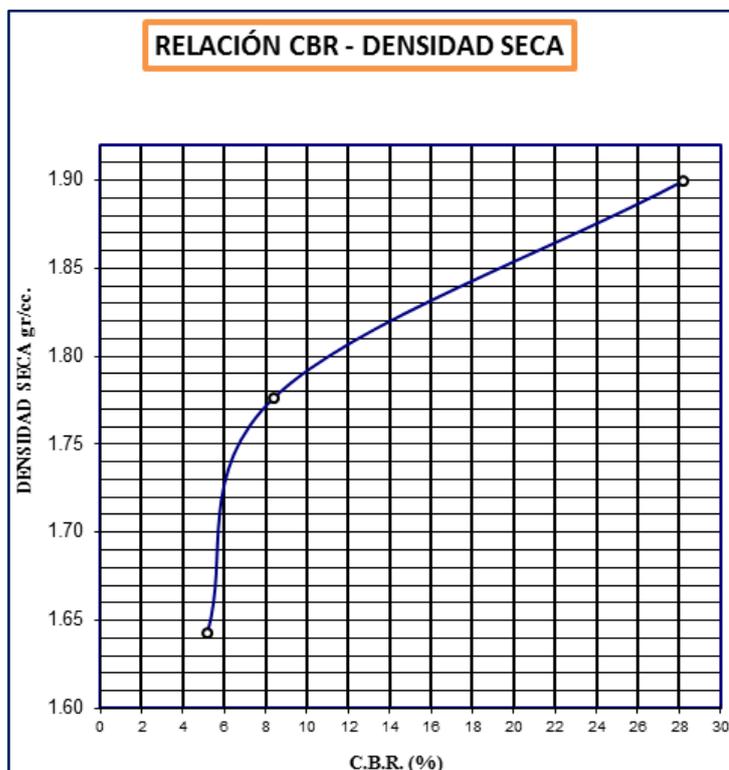


Figura 3.124: Curva de diseño CBR – Densidad Seca al 0% de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

3.5 METODOS ESTADÍSTICOS

La técnica estadística utilizada para el análisis de los resultados, es un análisis bivariado el cual consiste en realizar un tratamiento estadístico a dos variables de manera simultánea. Implicando el análisis comparativo para establecer si existe o no relación entre ellas. Los estadísticos utilizados para la presente investigación son el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de correlación de Spearman, ya que se utiliza para comparar dos variables cuantitativas con distribución normal en el caso de Pearson y con distribución no normal en el caso de Spearman. (Canavos C, 1988)

Es conveniente mencionar que el coeficiente de correlación de Pearson (paramétrico) se emplea si se puede asumir que dos variables continuas se distribuyen normalmente; de lo contrario, se elige el coeficiente de correlación de Spearman. La regresión lineal se usa

para predecir los cambios en una variable independiente (en caso de una regresión lineal simple) o varias (en caso de una regresión lineal múltiple) que pueden afectar el valor de la variable dependiente. Para el análisis de la regresión lineal es necesario considerar que la variable dependiente sea continua y contenga una distribución normal, en tanto que la relación entre una variable dependiente e independiente es lineal, y si tal suposición no se cumple, los resultados pueden ser incorrectos. (Gómez Gómez, Danglot Banck, & Vega Franco, 2013)

Tabla 3.6: Flujograma para elegir la prueba estadística adecuada.

Grupos	Objetivos	Distribución Normal	Distribución Normal	No Binomial
Uno	Variables cualitativas	RM = Casos y controles		
	Dos categorías (tablas de 2 x 2).	RMP = Estudio transversal RR = Cohorte y ensayo clínico		
	Diferentes resultados		> 30 casos = χ^2 < 30 casos = Exacta	
	Diferentes categorías de exposición.		de Fisher	
	Variables cuantitativas	Prueba t de Student de una muestra	U de Mann-Witney	
	Dos categorías, una variable numérica.			
	Una variable directa y una variable indirecta.	Regresión lineal simple	r de Spearman	
		r de Pearson		
		r² = Coeficiente de correlación		
	Una variable directa y dos o más variables indirectas.	r de Pearson r ² = Coeficiente de correlación	Regresión lineal múltiple	
	Comparar un grupo con un valor hipotético.	t de Student de una muestra	Wilcoxon	χ^2 o prueba binomial

Dos	No pareados	Prueba de t no pareada	U de Mann-Withney	Prueba exacta de Fisher (χ^2 para muestras grandes)
	Pareados	Prueba de t pareada	Wilcoxon	McNemar
	No pareados	ANOVA unidireccional	Kruskal-Wallis ANOVA en bloques	Prueba de χ^2
Tres a más	Pareados	Medidas repetidas ANOVA	Friedman	Q de Cochran
	Cuantificar la asociación entre dos variables	Pearson	r de Spearman	Coefficiente de contingencias
	Predecir el valor de otra variable medida	Regresión lineal o no lineal	Regresión paramétrica	no Regresión logística simple
	Predecir el valor de varias medias o de variables binomiales	Regresión lineal o no lineal o múltiple		Regresión logística múltiple

Fuente: (Gómez Gómez, Danglot Banck, & Vega Franco, 2013)

3.5.1 Coeficiente de correlación de Pearson

Tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariado conjunta. (Restrepo & González, 2007)

El coeficiente de correlación de Pearson está definido por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2][\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2]}}$$

Para interpretar el coeficiente de correlación (r) que se obtiene, se toma como criterio de decisión, la siguiente calificación:

Tabla 3.7: Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.

VALOR	SIGNIFICADO
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0,9 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,2 a 0,39	Correlación positiva baja
0,4 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,7 a 0,89	Correlación positiva alta
0,9 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Fuente: (Suárez Tapia, 2012)

3.5.1.1 Supuestos que fundamentan al coeficiente de correlación:

1. La distribución conjunta de las variables (X, Y) debe ser normal bivariado.
2. En términos prácticos para validar dicho supuesto se debe observar que cada variable se distribuya en forma normal, si una sola de las variables se desvía de la normalidad, tampoco es normal la distribución conjunta.
3. Debe existir una relación de tipo lineal entre las variables (X, Y).
4. Para cada valor de X, hay una subpoblación de valores de Y normalmente distribuidas.
5. Las subpoblaciones de valores Y tienen varianza constante.
6. Los promedios de las subpoblaciones de Y tienen ubicación en la misma línea recta.
7. Las subpoblaciones de X tienen varianza constante.
8. Las medias de las subpoblaciones de X se encuentran en la misma línea recta.
9. Para cada valor de Y hay una subpoblación de valores X que están normalmente distribuidas.

3.5.2 Coeficiente de correlación de Sperman

El coeficiente de correlación de Spearman es un coeficiente no paramétrico alternativo al coeficiente de correlación de Pearson cuando este no cumple los supuestos (3, 4 y 9). (Restrepo & González, 2007)

El coeficiente de correlación de Sperman está definido por:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}$$

$$d_i = x_i - y_i$$

Para interpretar el coeficiente de correlación (r_s) que se obtiene, se toma como criterio de decisión, la siguiente calificación:

Tabla 3.8: Grado de relación según coeficiente de correlación de Sperman.

RANGO	RELACIÓN
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa
-0.11 a -0.50	considerable
-0.01 a -0.10	Correlación negativa media
0.00	Correlación negativa débil
+0.01 a +0.10	No existe correlación
+0.11 a +0.50	Correlación positiva débil
+0.51 a +0.75	Correlación positiva media
+0.76 a +0.90	Correlación positiva considerable
+0.91 a +1.00	Correlación positiva muy fuerte
	Correlación positiva perfecta

Fuente: (Hernández Sampieri & Fernández Collado, 1998)

3.5.3 Prueba de Hipótesis.

Una vez calculado el valor del coeficiente de correlación interesa determinar si tal valor obtenido muestra que las variables X e Y están relacionadas en realidad o tan solo presentan dicha relación como consecuencia del azar.

La prueba o contraste de hipótesis es una prueba que se basa en los datos de una muestra de una variable aleatoria mediante la cual podemos rechazar una hipótesis sobre un parámetro de la población, llamada hipótesis nula (H_0), en favor de una hipótesis contraria, llamada hipótesis alternativa (H_a). (Sáez Castillo, 2012)

Tabla 3.9 Identificación de Hipótesis.

IDENTIFICACIÓN DE HIPÓTESIS	
Hipótesis nula H_0	Hipótesis alternativa H_1
La que contrastamos	Niega H_0 (y creemos que es “mejor”)
Los datos pueden refutarla.	Los datos pueden mostrar evidencia a favor.
No debería ser rechazada sin una buena razón.	No debería ser aceptada sin una gran evidencia a favor.
$H_0: p =, <=, >=$	$H_1: p, <, >$

Fuente: (Ibañez Quispe, 2009)

3.5.4 Prueba de Hipótesis para la Correlación con Pearson.

1. Hipótesis Estadística:

$$H_0: p = p_0$$

$$H_a: p \neq p_0$$

(H_0 =Ausencia de correlación entre las variables)

(H_a =Existencia de correlación entre las variables en forma directa)

2. Elegir el nivel de significación: “ α ” ($\alpha=0.01, \alpha= 0.05, \alpha= 0.10$)
3. Cálculo del valor experimental. r^2, gl, t, p : (r^2 = coeficiente de determinación)

$$t = \frac{r - p}{S_r} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Donde:

$$S_r = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}}$$

4. Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a
Si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a
5. Para concluir, realizamos la interpretación en base al paso 4.

3.5.5 Prueba de Hipótesis para la Correlación con Sperman.

1. Hipótesis Estadística:

- a. $H_0: p = p_0$

- b. $H_a: p \neq p_0$

- c. (H_0 =Ausencia de correlación entre las variables)

- d. (H_a =Existencia de correlación entre las variables en forma directa)

2. Elegir el nivel de significación: “ α ” ($\alpha=0.01$, $\alpha= 0.05$, $\alpha= 0.10$)
3. Clasificar por jerarquía los valores de X desde 1 hasta n (el número de parejas de valores de X y Y en la muestra). Clasificar por jerarquía los valores de Y desde 1 hasta n.
4. Calcular di para cada pareja de observaciones, restando la jerarquía de Yi de la jerarquía de Xi. Elevar al cuadrado cada di y calcular la suma de los valores al cuadrado.
5. Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a
Si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a
6. Para concluir, realizamos la interpretación en base al paso 4.

3.5.6 P-valor de un contraste o prueba de hipótesis.

El p-valor asociado al contraste se define como el mínimo nivel de significación con el que la hipótesis nula sería rechazada en favor de la alternativa. Dado que normalmente se elige como nivel de significación máximo = 0:05, se tiene que la regla de decisión en un contraste con ese nivel de significación, dado el p-valor, sería la siguiente:

Si $p < 0.05$, rechazamos H_0 en favor de H_a con más de un 95% de confianza.

Si $p \geq 0.05$, no podemos rechazar H_0 en favor de H_a con al menos un 95% de confianza.

En resumen, el p-valor permite utilizar cualquier otro nivel de significación, ya que si consideramos un nivel de significación α :

Si $p < \alpha$, rechazamos H_0 en favor de H_a con más de un $(1 - \alpha)$ por % de confianza.

Si $p \geq \alpha$, no podemos rechazar H_0 en favor de H_a con al menos un $(1 - \alpha)$ por % de confianza. (Sáez Castillo, 2012)

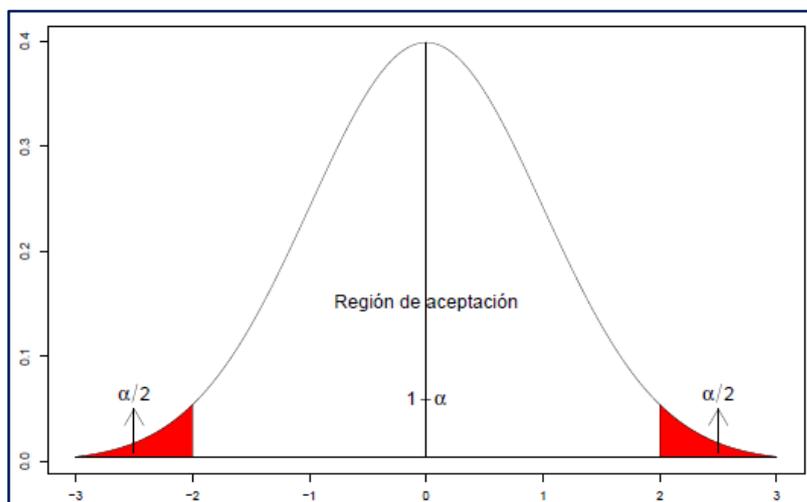


Figura 3.125: Región de rechazo en una prueba de hipótesis bilateral.

Fuente: (Sáez Castillo, 2012)

Nota: Los resultados del análisis de las pruebas estadísticas (prueba de normalidad, obtención de los coeficientes de correlación de Pearson, Sperman, Ecuaciones de regresión lineal y la Prueba de hipótesis) se muestra en el siguiente capítulo. Los análisis de las pruebas estadísticas a más detalle se presentan en el Anexo A de la presente investigación. El análisis Estadístico se realizó por software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0 y Microsoft Excel 2016.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS Y CARACTERÍSTICAS INICIALES DEL SUELO NATURAL EN ESTUDIO.

El suelo en estado natural seleccionado para la investigación es un suelo fino de color amarillento, específicamente arena arcillosa (SC), con presencia de limos (A-4 (0)). Del mencionado suelo se ha extraído muestra siguiendo el procedimiento acorde a la normativa para muestras inalteradas y alteradas NTP 339.151 (ASTM D4220) escurificando cuidadosamente la materia orgánica, la cual se encuentra en la superficie.

Nota: La validez de los ensayos realizados en laboratorio de suelos se presenta mediante una constancia que certifica fehacientemente lo investigado. Así como también las fichas de laboratorio utilizadas durante la investigación, hojas de cálculos y gráficos de los ensayos efectuados se presentan a más detalle en el Anexo B de la presente investigación.

En las siguientes tablas se muestran las características granulométricas y las propiedades físico mecánicas del suelo en estudio.

Tabla 4.1: Características Granulométricas del suelo natural.

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	
AASHTO:	A-4 (0)
SUCS:	SC
% de Grava:	11.89%
% de Arena:	47.78%
% pasa N° 200:	40.32%
Límite Líquido:	26.80%
Límite Plástico:	19.60%
Índice Plástico:	7.20%

Nota: Resultados obtenidos en base a los ensayos de granulometría y plasticidad.

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla 4.1 se observa que 11.89% es grava, 47.78% es arena y 40.32% de la muestra es limo y arcilla; por lo cual es *un suelo de grano fino* [A-4(0)] y así lo demuestra su clasificación según AASHTO, pero debido a su porcentaje de arena (47.78%), el suelo se clasifica como SC según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

A continuación, se muestra en las figuras 4.1 y 4.2 la curva granulométrica y la gráfica de limite líquido respectivamente del suelo fino en estudio en su estado natural (0% de PET).

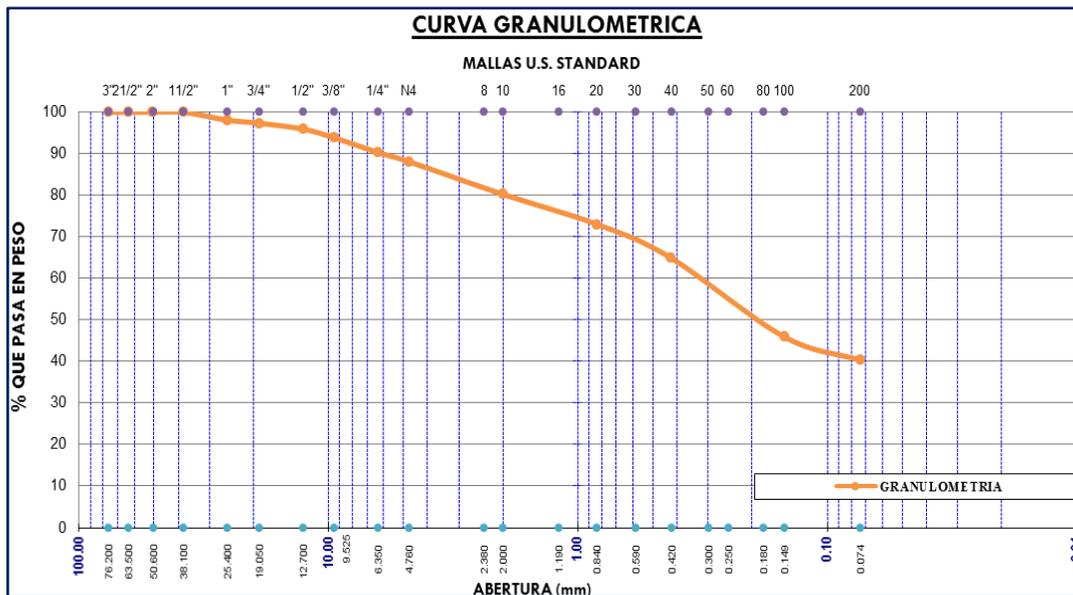


Figura 4.1: Curva Granulométrica de suelo fino en estudio.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

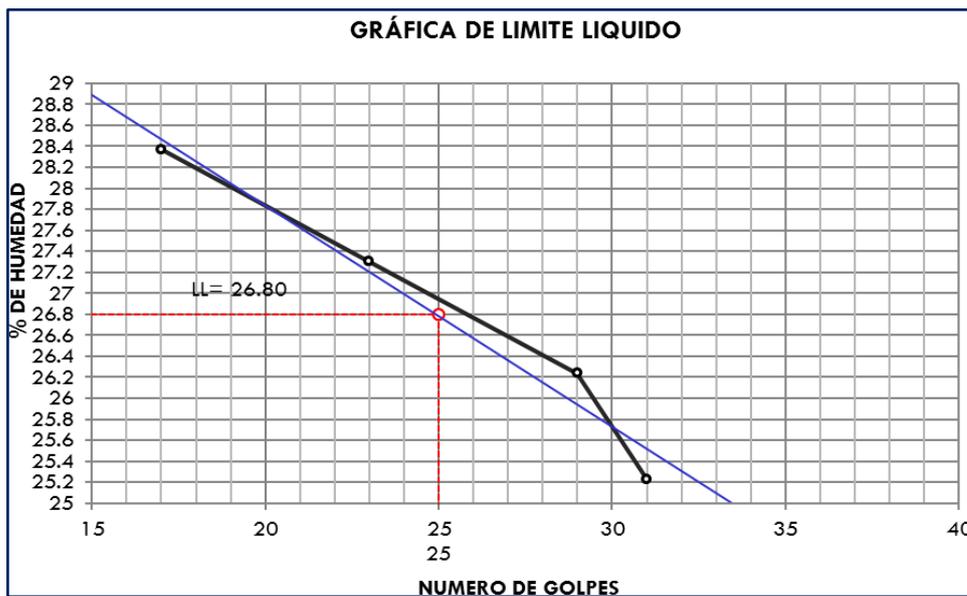


Figura 4.2: Gráfica de limite liquido de suelo fino en estudio.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Tabla 4.2: Características Físico Mecánicas del suelo en estudio.

PROPIEDAS FÍSICO MECÁNICAS DEL SUELO	
<i>HUMEDAD NATURAL:</i>	20.40%
<i>DENSIDAD SECA MÁXIMA:</i>	1.844 g/cm ³
<i>CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO:</i>	14.50%

Nota: Resultados obtenidos en base a los ensayos de Contenido de humedad y Proctor modificado.

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla 4.2 se observa que 20.40% es el contenido de humedad natural del suelo in situ, el cual nos indica la relación de agua que existe con respecto al peso de las partículas sólidas. También se puede observar los resultados del ensayo de compactación, en general el grado de compactación se mide en términos de su peso específico seco. Se debe recordar que la compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, disminuye la cantidad de asentamientos indeseables e incrementa la estabilidad de los taludes en terraplenes. Es así que el contenido de agua actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa de acuerdo a la cantidad de agua que se le añade al suelo hasta un punto en donde empieza a disminuir, es ahí en el pico más alto se obtiene el contenido de humedad óptimo del suelo que en nuestro estudio es 14.50% y el peso específico seco máximo o densidad seca máxima que en nuestro caso es 1.84 g/cm³.

A continuación, se muestra en la figura 4.3 la curva de compactación Proctor del suelo fino en estudio en su estado natural (0% de PET).



Figura 4.3: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 0% de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Tabla 4.3: CBR de suelo fino en su estado inicial.

RESUMEN DE ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) EN SUELO NO ESTABILIZADO									
ENSAYO	DENSIDAD SECA MÁXIMA ($\delta_{dm\acute{a}x}$) (g/cm3)	CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD (CHO) (%)	ENERGÍA DE COMPATACIÓN (golpes)	DENSIDAD SECA (g/cm3)	CBR (%)	RESULTADO CBR	PROMEDIO DE CBR AL 100%		
1° ENSAYO	1.844	14.50	12	1.642	5.15	Penetración: 0.1"	12	5.74	GOLPES
			25	1.777	8.41				
			56	1.899	28.18				
2° ENSAYO	1.844	14.50	12	1.635	4.64	Penetración: 0.11"	25	8.72	GOLPES
			25	1.766	8.12				
			56	1.863	27.59				
3° ENSAYO	1.844	14.50	12	1.648	7.42	Penetración: 0.1"	56	28.91	GOLPES
			25	1.771	9.63				
			56	1.908	30.98				

Nota: Resultados obtenidos en base al ensayo California Bearing Ratio (CBR)

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla 4.3 se observa que el CBR del suelo en estudio, en su estado natural al 100% de la densidad seca máxima ($\delta_{dm\acute{a}x}$) y a una penetración de 0.1" (2.5mm) es 28.91. Lo cual nos indica que según la normativa peruana es apto para Subrasante ya que tiene un CBR $\geq 6\%$ (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de carreteras: Suelos, 2014). No obstante, no es apto para Sub base (CBR mínimo 40%) y Base (CBR mínimo 80%) (Ministerio de Transportes y Comunicaciones "EG", 2013).

A continuación, se muestra en las figuras 4.4 y 4.5 las curvas CBR a 12, 25, 56 golpes y la curva CBR- Densidad seca respectivamente del suelo fino en estudio en su estado natural (0% de PET). Solo se mostrará los resultados del ensayo CBR N°01 por cuestiones de formato, sin embargo, en los anexos se puede apreciar las gráficas en su totalidad de los tres ensayos CBR realizados.

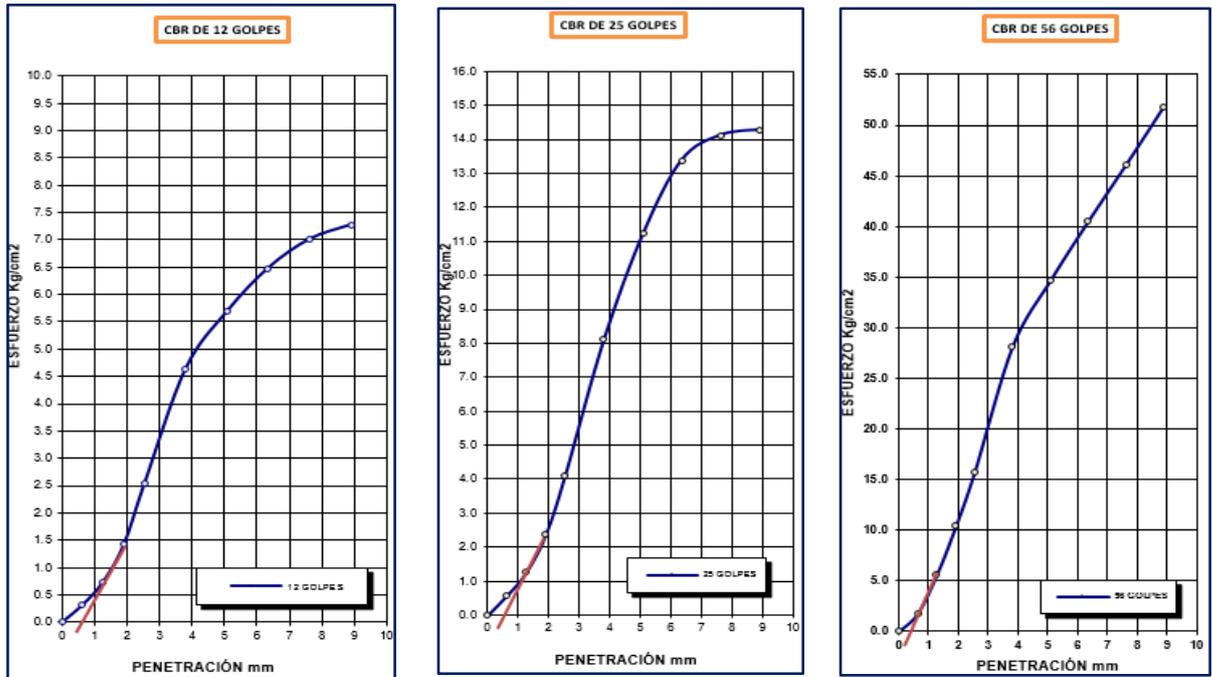


Figura 4.4: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 0% de PET).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

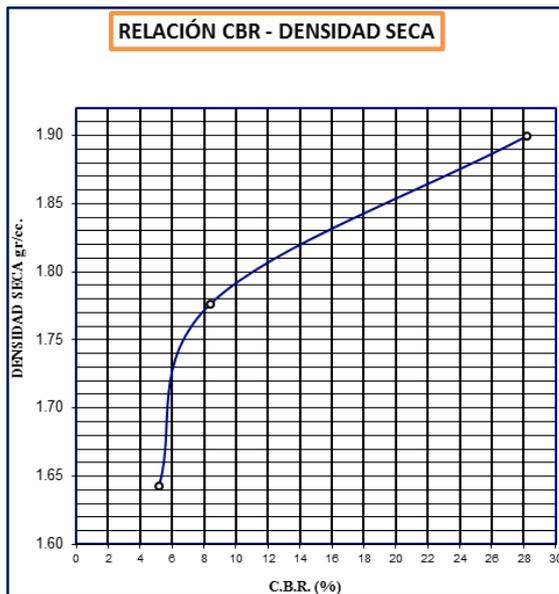


Figura 4.5: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 0% de PET (Ensayo N°01).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Tabla 4.4: Expansión de suelo fino en su estado inicial.

RESUMEN DE LA EXPANSIÓN EN SUELO NO ESTABILIZADO CON PET					
PORCENTAJE DE PET	ENSAYO	Nº DE GOLPES	EXPANSIÓN	PROMEDIO	
0%	1º ENSAYO	12	-0.340	12 GOLPES	-0.289
		25	1.361		
		56	3.295		
	2º ENSAYO	12	-0.164	25 GOLPES	1.573
		25	1.523		
		56	3.313		
	3º ENSAYO	12	-0.365	56 GOLPES	3.275
		25	1.836		
		56	3.218		

Nota: Resultados obtenidos en base al ensayo California Bearing Ratio (CBR)

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla 4.4 se observa la expansión del suelo en estudio, en su estado natural obtenido del ensayo de CBR. La expansión al 100% de la densidad seca máxima ($\delta_{dm\acute{a}x}$) y a una penetración de 0.1" (2.5mm) es 3.275%. Las especificaciones establecen que los materiales de préstamo para: Sub Base deben tener expansiones menores de 2% y para Base deben tener expansiones menores de 1% (Universidad Nacional de Ingeniería, FIC-CISMID, CBR-Ing. Luis Chang Chang). Lo cual nos indicaría que la expansión de nuestro suelo está por encima de estos valores.

Se debe de mencionar también que En el artículo "Cálculos realizados por el ensayo CBR incluido en HCLab" con autoría del Ing. Sánchez Leal, menciona que se admiten hinchamientos negativos, raros, aunque no imposibles y que estos generalmente ocurren en los suelos areno limosos, caso contrario ocurre con los suelos arcillosos. Lo cual tendría relación con la clasificación de nuestro suelo en estudio.

4.2 ANÁLISIS Y CARACTERÍSTICAS FÍSICO MECÁNICAS DE SUELO FINO CON ADICIÓN DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET).

Se analizaron las siguientes características físicas mecánicas que presenta el suelo:

- Densidad seca máxima, Contenido de humedad óptimo.
- Parámetros de resistencia al corte del suelo (CBR).

4.2.1 Densidad seca máxima, Contenido de humedad óptimo.

Para obtener los valores de la “Densidad seca máxima y del Contenido de humedad óptimo” se tiene que realizar el ensayo de “Proctor Modificado”, el cual nos proporcionará el valor del contenido de humedad apropiado del suelo en estudio para que alcance su densidad seca máxima y a la vez obtenga su resistencia máxima. Los datos analizados se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 4.5: Densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo de suelo fino en estudio a diferentes porcentajes de PET.

INDICADOR	DENSIDAD SECA MÁXIMA ($\delta_{dm\acute{a}x}$) (g/cm ³)	CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO (CHO) (%)
0%	1.844	14.50
2%	1.802	15.21
4%	1.778	15.38
6%	1.756	15.45
8%	1.747	15.72
10%	1.739	16.10

Nota: Resultados obtenidos en base al ensayo de Proctor modificado adicionando PET a suelo fino.

Fuente: Elaboración Propia.

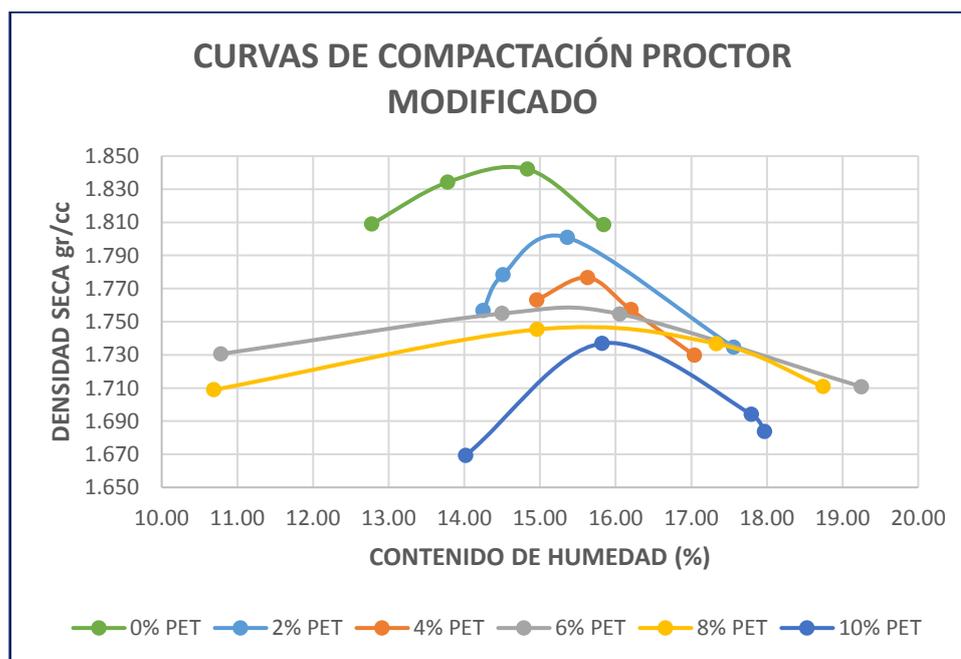


Figura 4.6: Curvas de compactación a distintos porcentajes de PET propuestos.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

De la tabla 4.5 y de la figura 4.6 se observa una disminución progresiva de la Máxima Densidad Seca al incrementar PET en los porcentajes propuestos, esto ocurre debido a que el PET tiene una densidad inferior a la del suelo, es por ello que al ocupar un espacio que antes ocupaba el suelo en su estado natural la densidad disminuye. Por otro lado, se observa un ascenso progresivo del Contenido de Humedad Óptimo, este ascenso ocurre debido a que el PET al no absorber agua y al tener una superficie lisa hace que la fricción que tiene con el suelo sea casi nula, no obstante, al adicionar más agua al suelo hace que en conjunto con el PET tenga una mejor adherencia.

En relación a lo explicado de la tabla 4.2 se concluye que al incrementar el contenido de agua tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas.

A continuación, se muestra en las siguientes figuras las curvas de compactación Proctor del suelo fino en estudio a los distintos porcentajes de PET propuestos (0, 2, 4, 6, 8, 10%).

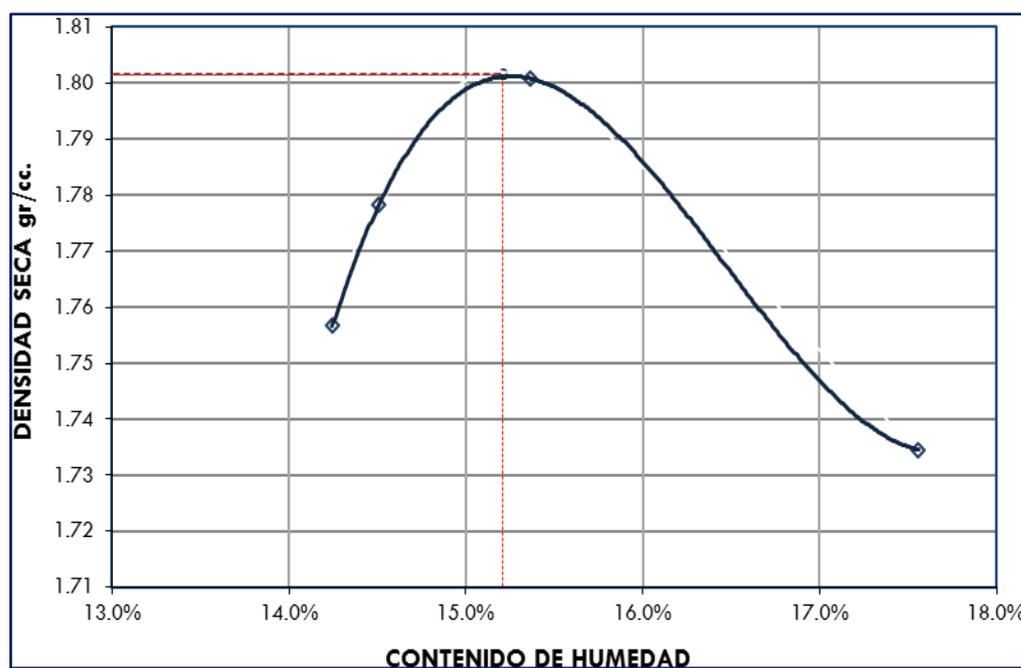


Figura 4.7: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 2% de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)



Figura 4.8: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 4% de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

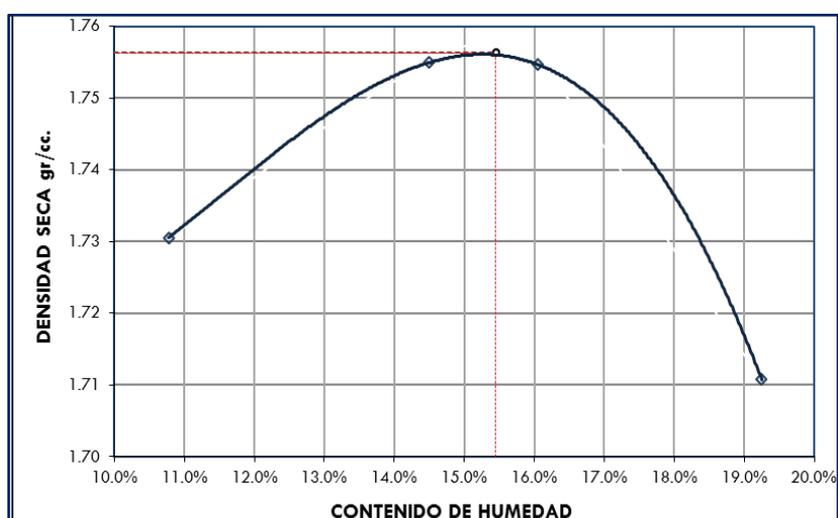


Figura 4.9: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 6% de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

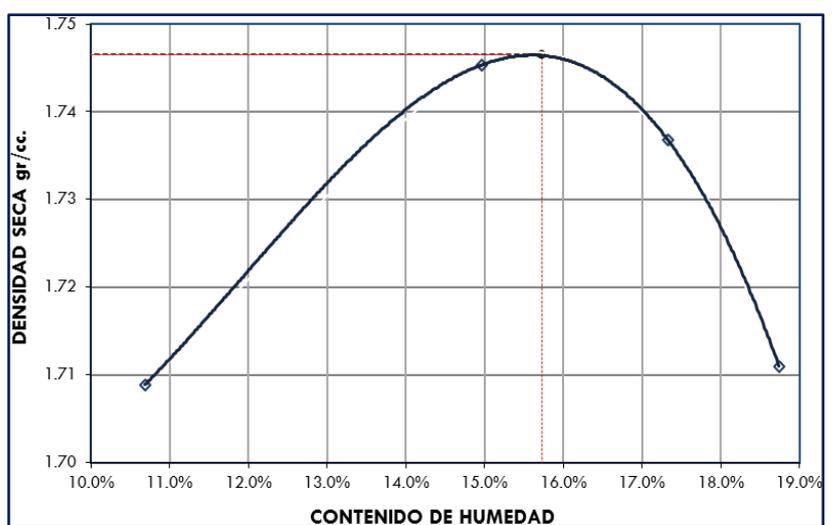


Figura 4.10: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 8% de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

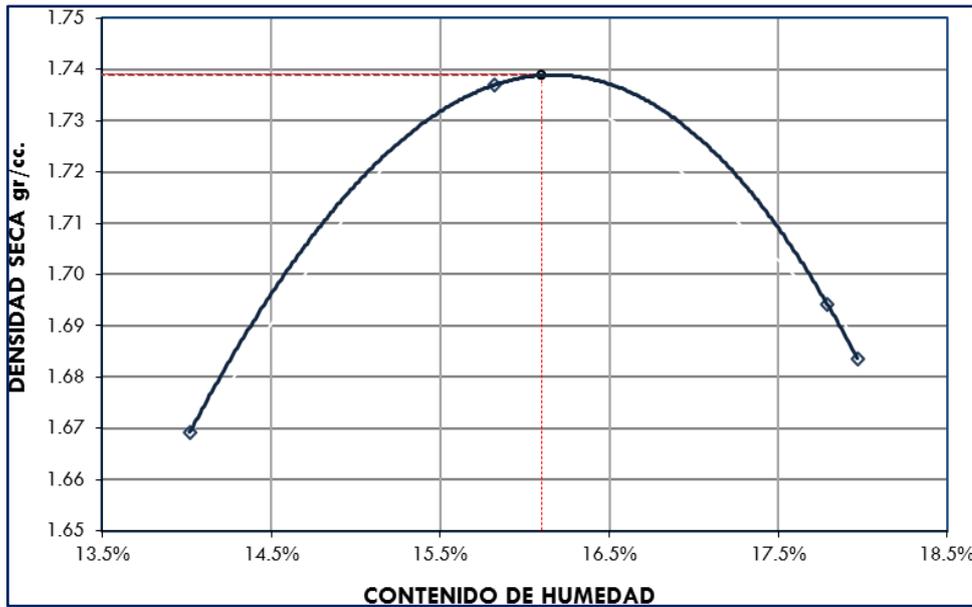


Figura 4.11: Gráfica de Curva de compactación de suelo fino en estudio al 10% de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

4.2.2 Parámetros de resistencia al corte del suelo (CBR).

Para obtener el parámetro “CBR” (capacidad de soporte de suelos compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables) se tiene que realizar el ensayo de “California bearing ratio”, el cual nos proporcionará el valor de dicho parámetro y su expansión a diferentes energías de compactación. Para los ensayos de CBR realizados se utilizó como “humedad óptima” al “CHO” del suelo en su estado natural, puesto que el PET al ser un plástico no absorbe agua y considerando que el suelo en estudio en su estado natural logra densificarse mejor con un “CHO” de 14.50%, el cual lo hace más resistente a diversos esfuerzos. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.6: CBR de suelo fino en estudio a diferentes porcentajes de PET.

RESUMEN DE ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) EN SUELO ESTABILIZADO CON PET									
PORCENTAJE DE PET	ENSAYO	DENSIDAD SECA MÁXIMA ($\delta_{dm\acute{a}x}$) (g/cm ³)	CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD (CHO) (%)	ENERGÍA DE COMPACTACIÓN (golpes)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	CBR (%)	RESULTADO CBR	PROMEDIO DE CBR AL 100%	
2%	1° ENSAYO	1.844	14.50	12	1.655	8.51	Penetración: 0.1"	12	8.67
				25	1.764	21.45			
				56	1.846	50.09			

	2°	1.844	14.50	12	1.623	7.69	Penetración:	0.1"	25	22.01
	ENSAYO			25	1.751	21.16	100%δdmáx	49.34	GOLPES	
				56	1.828	49.34				
	3°	1.844	14.50	12	1.661	9.81	Penetración:	0.1"	56	50.65
	ENSAYO			25	1.808	23.42	100%δdmáx	52.51	GOLPES	
				56	1.867	52.51				
4%	1°	1.844	14.50	12	1.685	7.98	Penetración:	0.1"	12	7.75
	ENSAYO			25	1.758	11.62	100%δdmáx	20.67	GOLPES	
				56	1.824	20.67				
	2°	1.844	14.50	12	1.638	6.63	Penetración:	0.1"	25	11.69
	ENSAYO			25	1.721	10.72	100%δdmáx	19.53	GOLPES	
				56	1.773	19.53				
	3°	1.844	14.50	12	1.705	8.65	Penetración:	0.1"	56	20.39
	ENSAYO			25	1.783	12.74	100%δdmáx	20.99	GOLPES	
				56	1.846	20.99				
6%	1°	1.844	14.50	12	1.559	5.10	Penetración:	0.1"	12	5.15
	ENSAYO			25	1.65	11.45	100%δdmáx	19.51	GOLPES	
				56	1.768	19.51				
	2°	1.844	14.50	12	1.508	4.57	Penetración:	0.1"	25	11.28
	ENSAYO			25	1.595	10.47	100%δdmáx	18.42	GOLPES	
				56	1.71	18.42				
	3°	1.844	14.50	12	1.566	5.77	Penetración:	0.1"	56	19.29
	ENSAYO			25	1.652	11.92	100%δdmáx	19.94	GOLPES	
				56	1.791	19.94				
8%	1°	1.844	14.50	12	1.575	3.97	Penetración:	0.1"	12	4.35
	ENSAYO			25	1.693	9.22	100%δdmáx	18.57	GOLPES	
				56	1.762	18.57				
	2°	1.844	14.50	12	1.572	3.75	Penetración:	0.1"	25	8.63
	ENSAYO			25	1.687	7.32	100%δdmáx	17.79	GOLPES	
				56	1.74	17.79				
	3°	1.844	14.50	12	1.596	5.32	Penetración:	0.1"	56	18.38
	ENSAYO			25	1.72	9.34	100%δdmáx	18.77	GOLPES	
				56	1.8	18.77				
10%	1°	1.844	14.50	12	1.495	2.77	Penetración:	0.1"	12	3.07
	ENSAYO			25	1.599	5.55	100%δdmáx	17.20	GOLPES	
				56	1.73	17.20				
	2°	1.844	14.50	12	1.46	2.70	Penetración:	0.1"	25	5.75
	ENSAYO			25	1.559	5.10	100%δdmáx	16.77	GOLPES	
				56	1.676	16.77				
	3°	1.844	14.50	12	1.528	3.75	Penetración:	0.1"	56	17.36
	ENSAYO			25	1.646	6.60	100%δdmáx	18.12	GOLPES	
				56	1.767	18.12				

Nota: Resultados obtenidos en base al ensayo California Bearing Ratio (CBR).

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.7: CBR promedio de suelo fino en estudio a diferentes porcentajes de PET.

RESUMEN DE CBR PROMEDIO			
% PET	12 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES
0%	5.74	8.72	28.91
2%	8.67	22.01	50.65
4%	7.75	11.69	20.39
6%	5.15	11.28	19.29
8%	4.35	8.63	18.38
10%	3.07	5.75	17.36

Nota: Resultados obtenidos en base al ensayo California Bearing Ratio (CBR).

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla 4.7 se observa que para la energía de compactación de 12 y 25 golpes hay un incremento progresivo del CBR en los porcentajes de 2% y 4%. Esto debido a que al tener una energía de compactación baja las partículas sólidas de PET quedan más “sueltas” cubriendo superficialmente al suelo, es por ello, que el PET al tener una superficie plana distribuyen de manera uniforme los esfuerzos al suelo dándole una mejor resistencia a la penetración. Sin embargo, en los porcentajes de PET al 6%, 8% y 10% el CBR disminuye lo cual no hace deducir que a mayor cantidad de PET y por tener una superficie plana y lisa no hay una buena adherencia de suelo- PET, reduciendo así su CBR.

Para una energía de compactación de 56 golpes, referida al 100% de la densidad seca máxima ($\delta_{dm\acute{a}x}$) y a una penetración de 0.1” (2.5mm) se observa que el CBR del suelo en estudio adicionando PET al 2% se incrementa considerablemente. Lo que nos lleva deducir que el suelo fino al combinarse con un porcentaje mínimo de PET hace una combinación ideal, la cual trabajara de manera eficaz al esfuerzo cortante, ya que al tener cantidades mínimas de PET compactadas con el suelo al 100% de su DSM y conjuntamente al CHO del suelo en su estado natural logran una mejora adherencia entre particular sólidas, adicionando a ello la dureza del plástico hacen más resistente al suelo.

Sin embargo, al incrementar la cantidad de PET a partir del 2% el CBR disminuye progresivamente. Todo ello resultado de una adherencia deficiente suelo-PET ya que compactado al 100% de su DSM y al CHO del suelo en su estado natural hace que al

tener más cantidad de PET el contacto suelo-PET (deseable) sea inferior al contacto PET-PET (indeseable por la superficie lisa del PET) lo que conlleva un esfuerzo cortante bajo.

Finalmente se concluye que según el manual peruano emitido por el Ministerio de transportes y Comunicaciones y la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles: “Manual de Carreteras” Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos, Capítulo III sub sección Subrasante del camino, que el suelo en estudio con adición del 2% hasta el 10% de PET es apto para Subrasante ya que tiene un CBR $\geq 6\%$.

Así como también se concluye que según la normativa peruana vigente EG-2013 sección Sub bases y Bases granulares, que el suelo en estudio con adición del 2% de PET es apto para Sub base (CBR mínimo 40%) mas no para Base (CBR mínimo 80%).

A continuación, se muestra en las siguientes figuras las curvas CBR a 12, 25, 56 golpes y las curvas CBR- Densidad seca del suelo fino en estudio estabilizado a los distintos porcentajes de PET propuestos (0, 2, 4, 6, 8, 10%). Solo se mostrará los resultados del ensayo de CBR N°01 de cada porcentaje de PET por cuestiones de formato, sin embargo, en los anexos se puede apreciar las gráficas en su totalidad de los tres ensayos CBR realizados por cada porcentaje de PET.

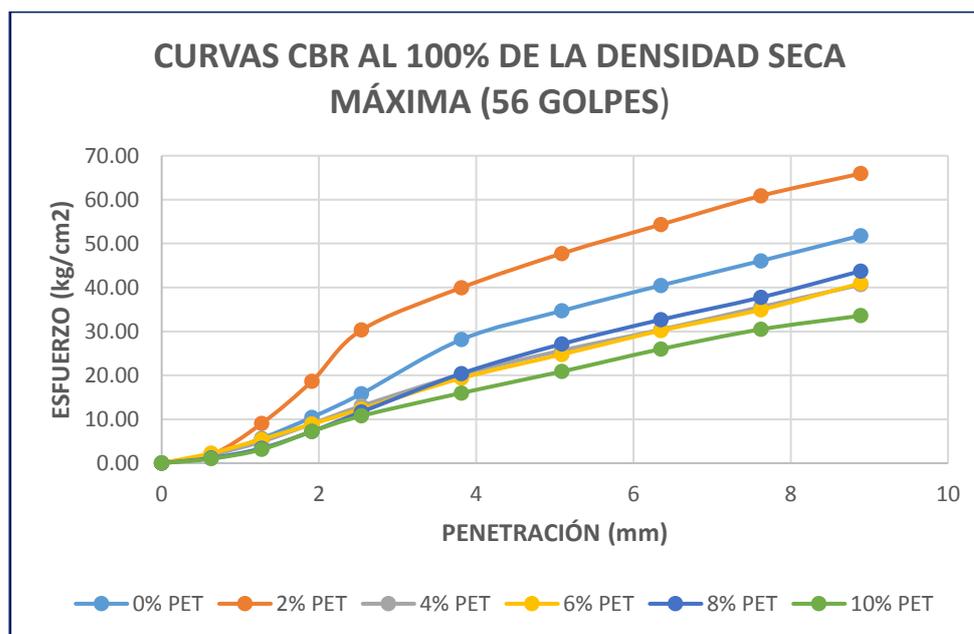


Figura 4.12: Curvas CBR al 100% de la DSM a distintos porcentajes de PET.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

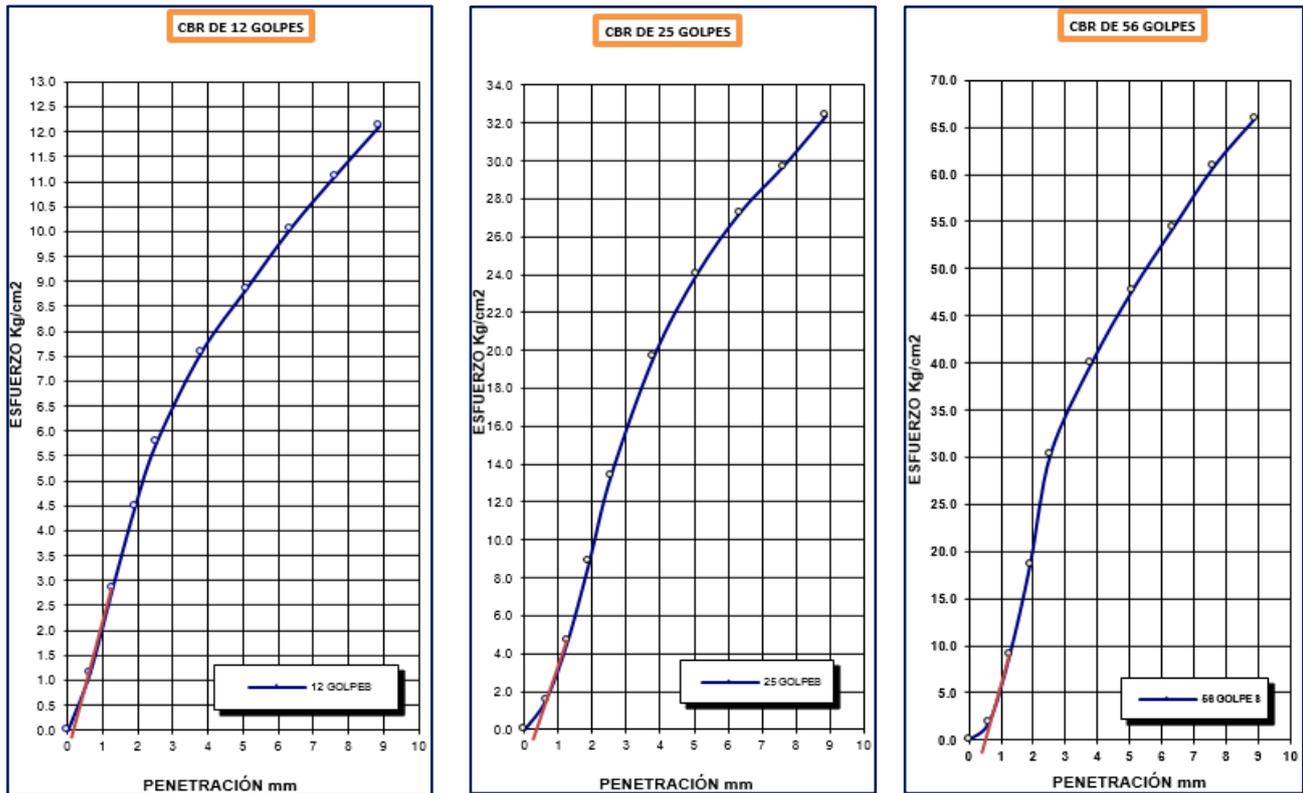


Figura 4.13: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 2% de PET).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

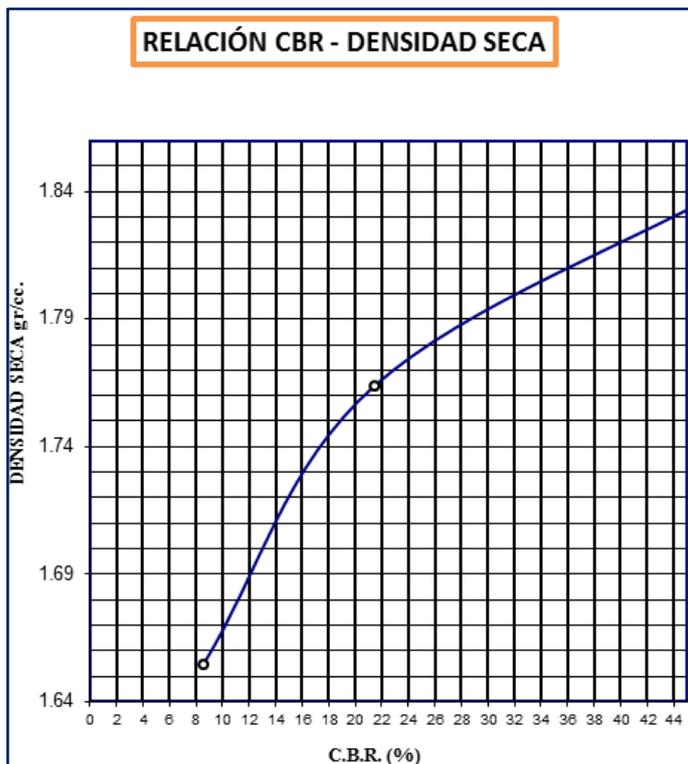


Figura 4.14: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 2% de PET (Ensayo N°01).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

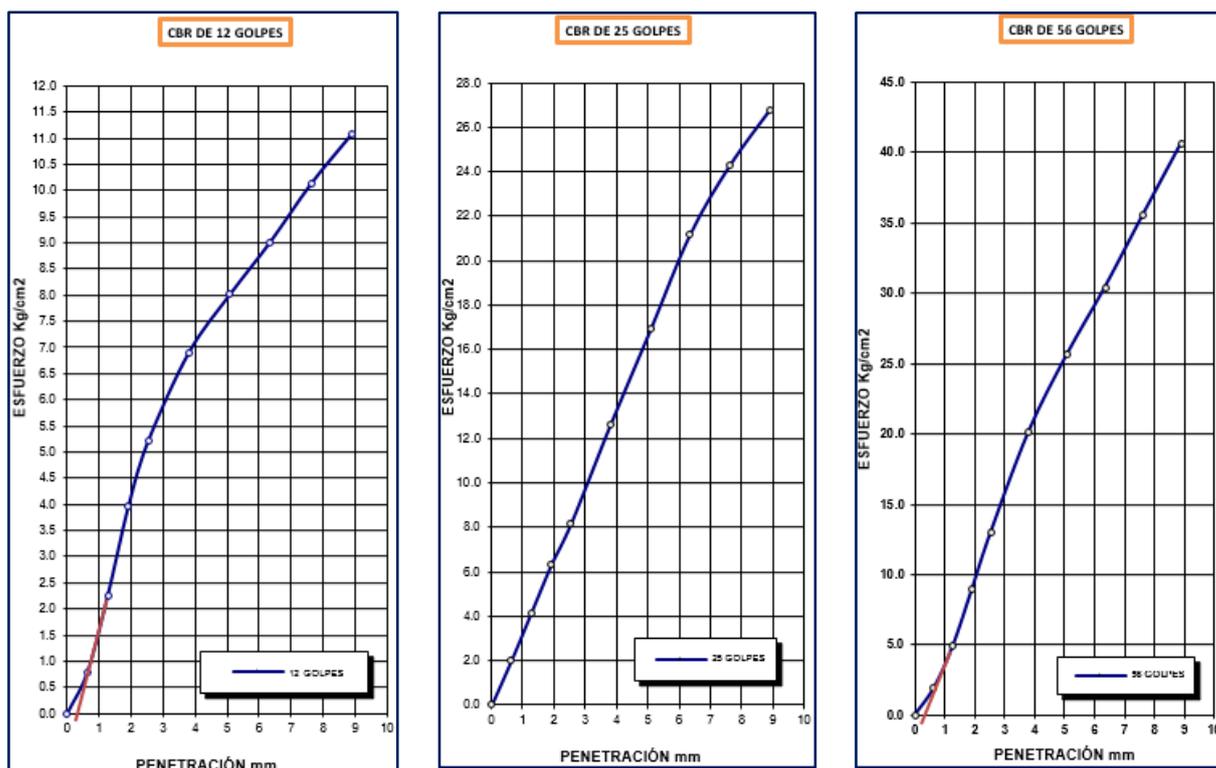


Figura 4.15: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 4% de PET).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

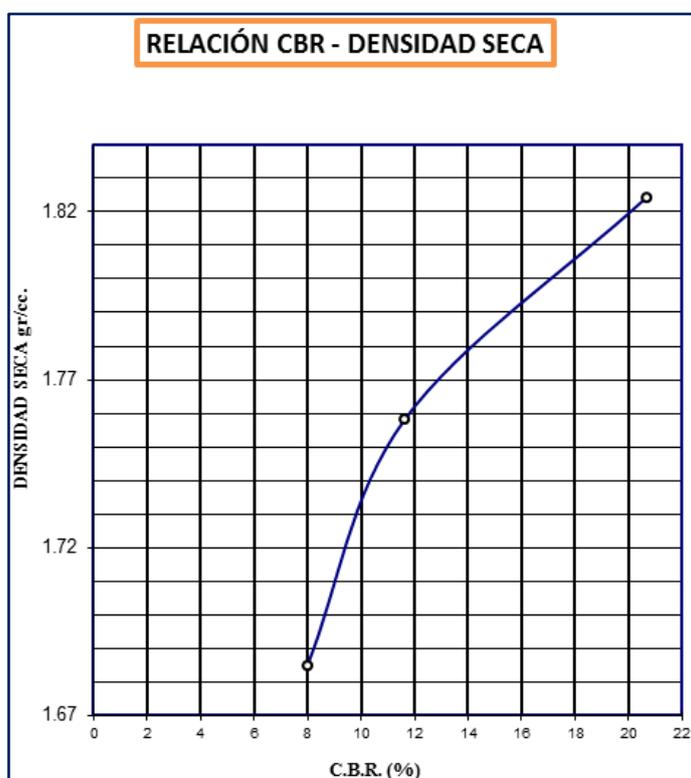


Figura 4.16: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 4% de PET (Ensayo N°01).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

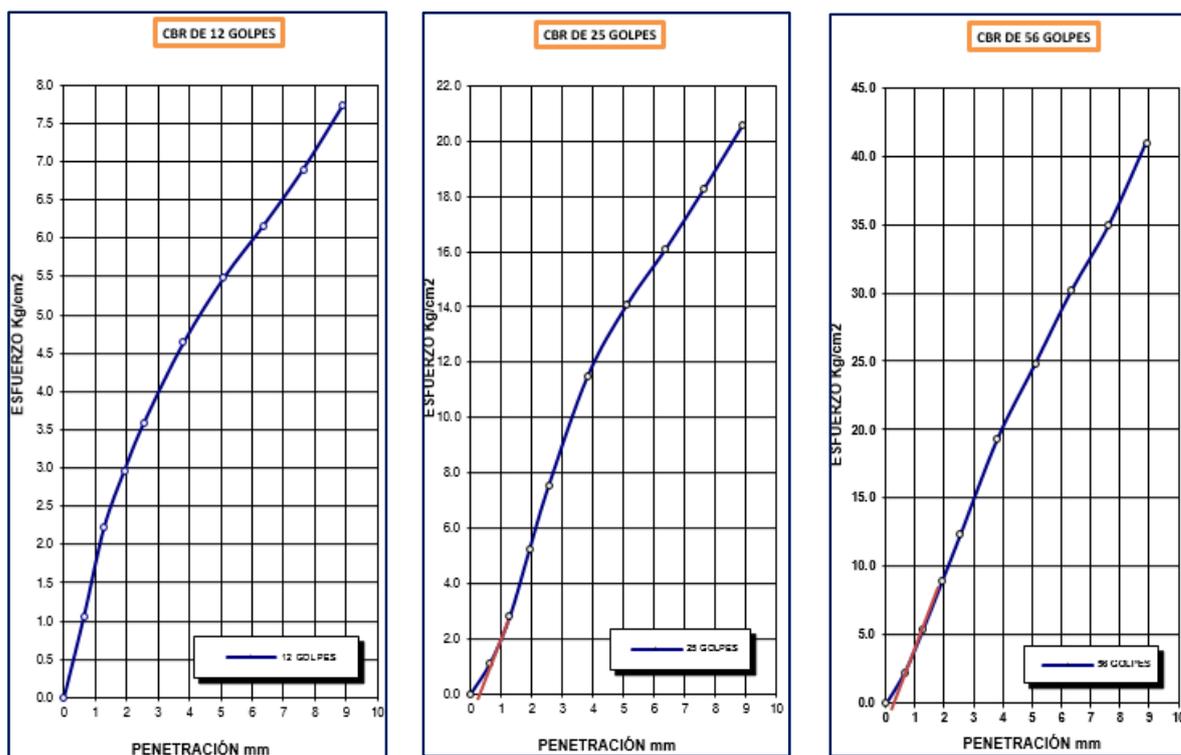


Figura 4.17: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 6% de PET).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

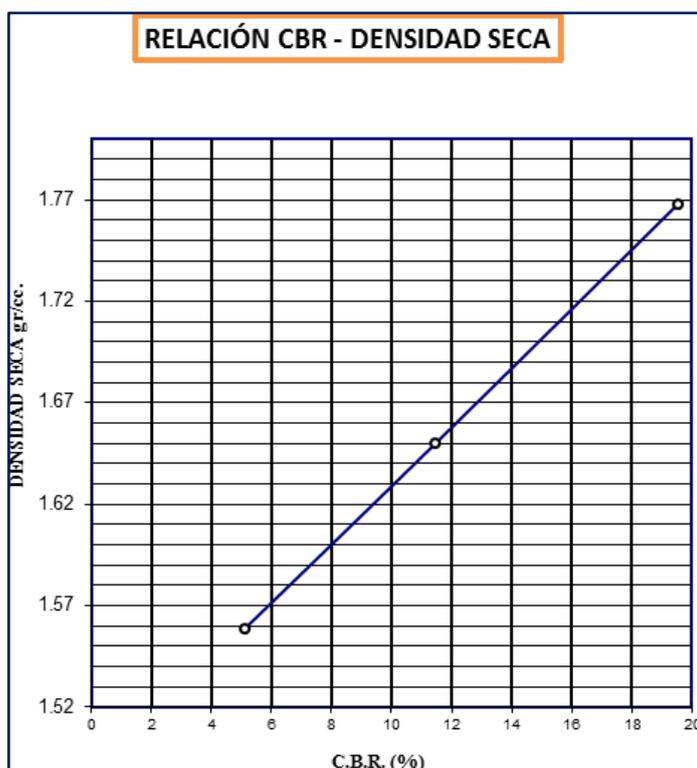


Figura 4.18: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 6% de PET (Ensayo N°01).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

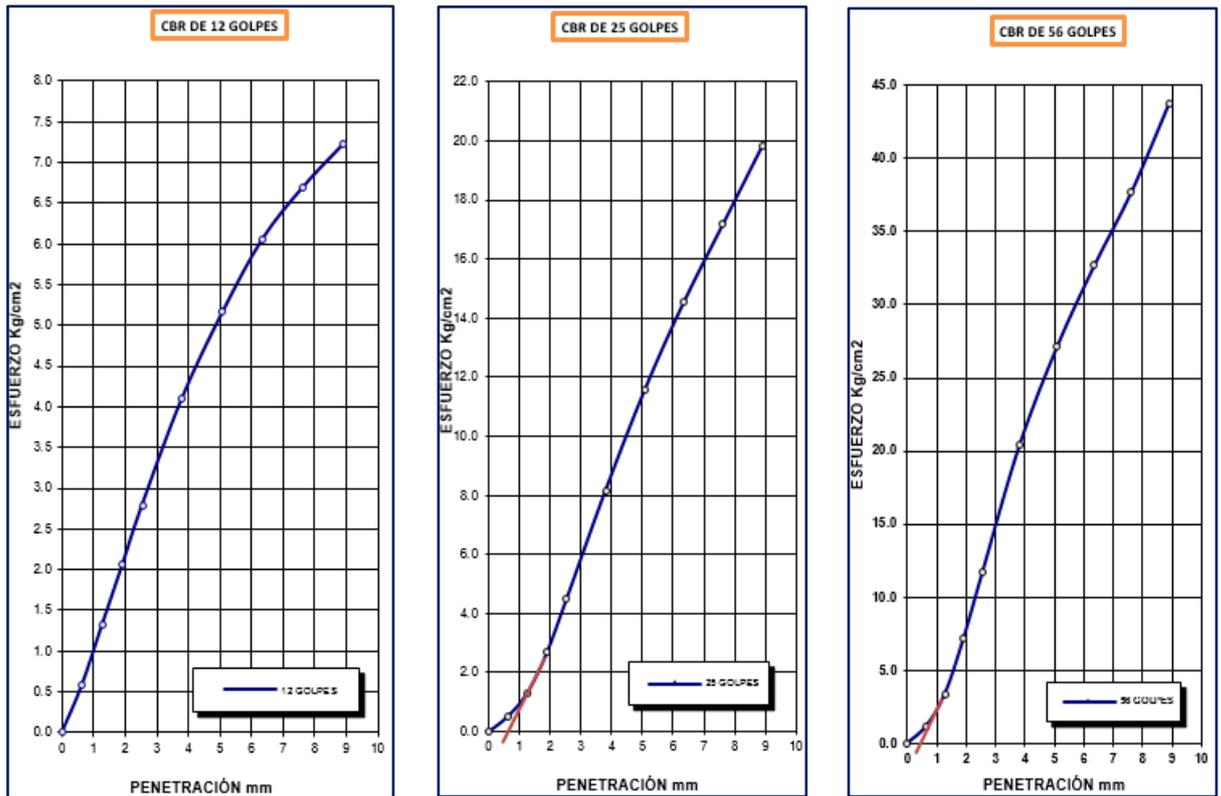


Figura 4.19: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 8% de PET).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

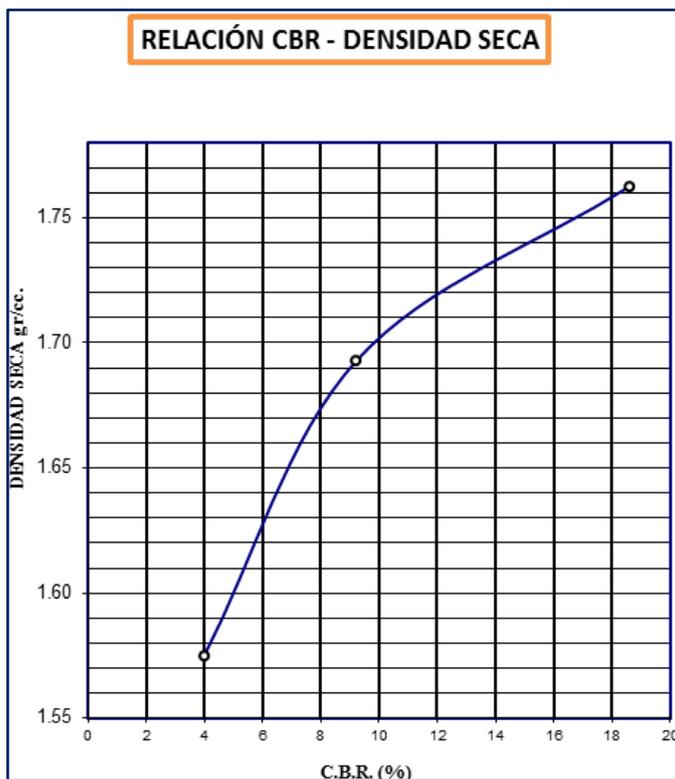


Figura 4.20: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 8% de PET (Ensayo N°01).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

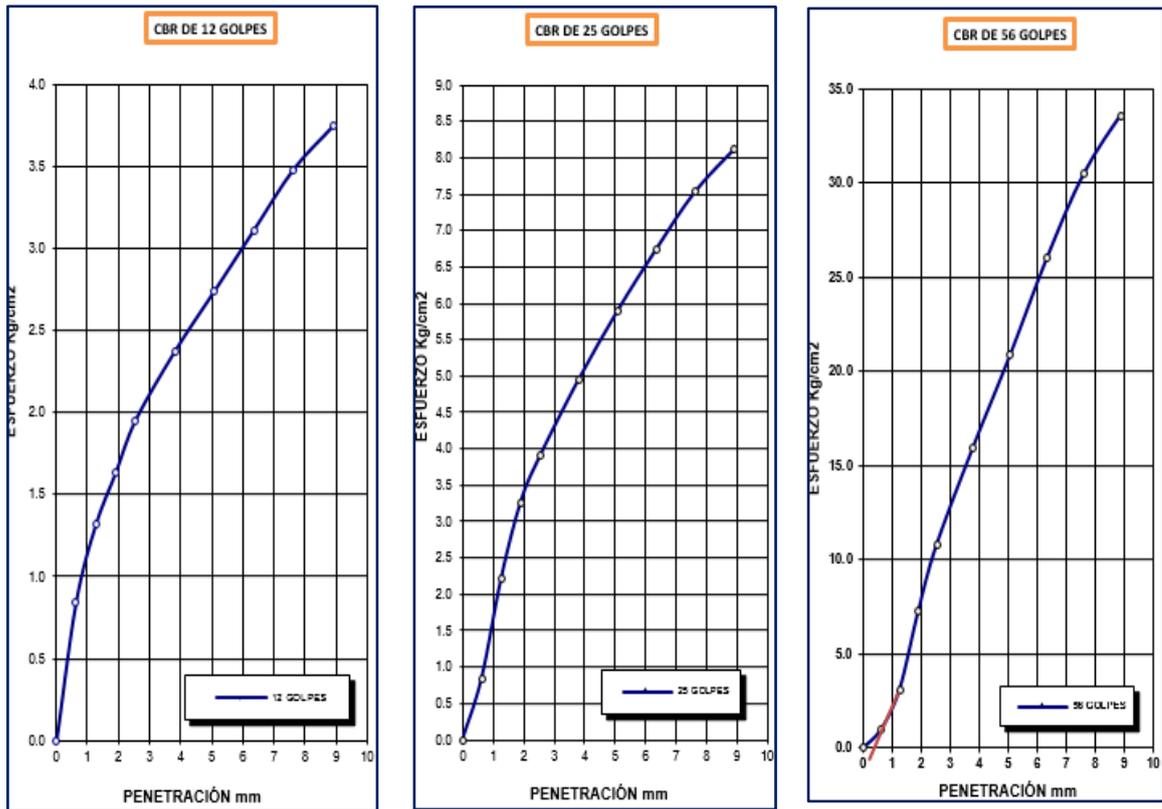


Figura 4.21: Curvas CBR de suelo fino en estudio a 12, 25 y 56 golpes de izquierda a derecha del ensayo N°01 (al 10% de PET).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

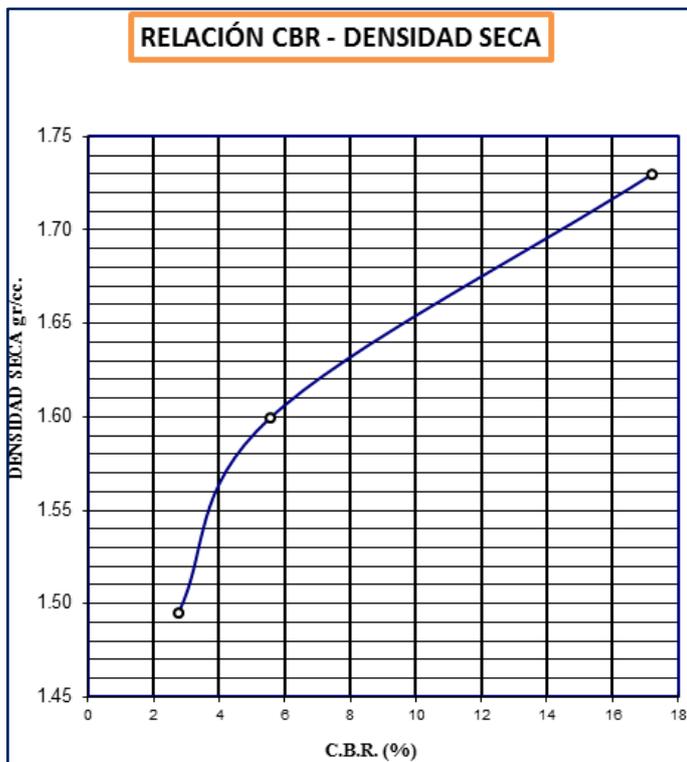


Figura 4.22: Curva CBR-Densidad Seca de suelo fino en estudio al 10% de PET (Ensayo N°01).

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Tabla 4.8: Expansión de suelo fino con adición de PET en porcentajes propuestos.

RESUMEN DE LA EXPANSIÓN EN SUELO ESTABILIZADO CON PET					
PORCENTAJE DE PET	ENSAYO	N° DE GOLPES	EXPANSIÓN	PROMEDIO	
2%	1° ENSAYO	12	0.583	12 GOLPES	0.644
		25	1.412		
		56	0.554		
	2° ENSAYO	12	0.836	25 GOLPES	1.306
		25	1.375		
		56	0.042		
	3° ENSAYO	12	0.513	56 GOLPES	0.367
		25	1.133		
		56	0.506		
4%	1° ENSAYO	12	0.922	12 GOLPES	0.916
		25	0.962		
		56	2.708		
	2° ENSAYO	12	0.877	25 GOLPES	1.114
		25	1.011		
		56	2.144		
	3° ENSAYO	12	0.947	56 GOLPES	2.534
		25	1.370		
		56	2.750		
6%	1° ENSAYO	12	0.838	12 GOLPES	0.793
		25	0.014		
		56	0.367		
	2° ENSAYO	12	0.774	25 GOLPES	0.143
		25	0.219		
		56	0.158		
	3° ENSAYO	12	0.765	56 GOLPES	0.283
		25	0.196		
		56	0.324		
8%	1° ENSAYO	12	0.549	12 GOLPES	0.567
		25	1.849		
		56	0.661		
	2° ENSAYO	12	0.654	25 GOLPES	1.646
		25	1.491		
		56	1.509		
	3° ENSAYO	12	0.499	56 GOLPES	1.069
		25	1.598		
		56	1.038		
10%	1° ENSAYO	12	2.216	12 GOLPES	2.231
		25	2.468		
		56	2.650		

2° ENSAYO	12	2.306	25 GOLPES	2.494
	25	2.453		
	56	2.684		
3° ENSAYO	12	2.170	56 GOLPES	2.622
	25	2.560		
	56	2.533		

Nota: Resultados obtenidos en base al ensayo California Bearing Ratio (CBR).

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla 4.8 se observa la expansión del suelo con adición de PET en sus diferentes proporciones propuestas. La expansión al 100% de la densidad seca máxima ($\delta_{dm\acute{a}x}$) y a una penetración de 0.1” (2.5mm) con adición de PET al 2% (porcentaje óptimo de PET que mejora la resistencia al suelo) es 0.367%. Las especificaciones establecen que los materiales de préstamo para: Sub Base deben tener expansiones menores de 2% y para Base deben tener expansiones menores de 1% (Universidad Nacional de Ingeniería, FIC-CISMID, CBR-Ing. Luis Chang Chang). **Lo cual nos indicaría que la expansión de nuestro suelo con adición al 2% de PET cumpliría esta condición.**

4.3 RESULTADOS DE CORRELACIONES Y PRUEBA DE HIPÓTESIS.

En base a lo explicado en ítem 3.5 “Métodos Estadísticos” se resume:

Para las pruebas de normalidad analizadas en el software estadístico IBM SPSS se debe tener en cuenta que, para muestras con menos de 50 datos, se utiliza la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. La cual indica que, si el valor de significancia obtenido de la prueba de normalidad es menor que 0.05 (nivel de significancia optado) entonces las variables tienen distribución No normal y si la significancia es mayor que 0.05 entonces las variables tienen distribución Normal. Las variables con distribución normal utilizarán el coeficiente de correlación de Pearson y para las variables que tengan una distribución No normal se utilizará el coeficiente de correlación de Spearman.

4.3.1 Correlación de la Máxima Densidad Seca y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.

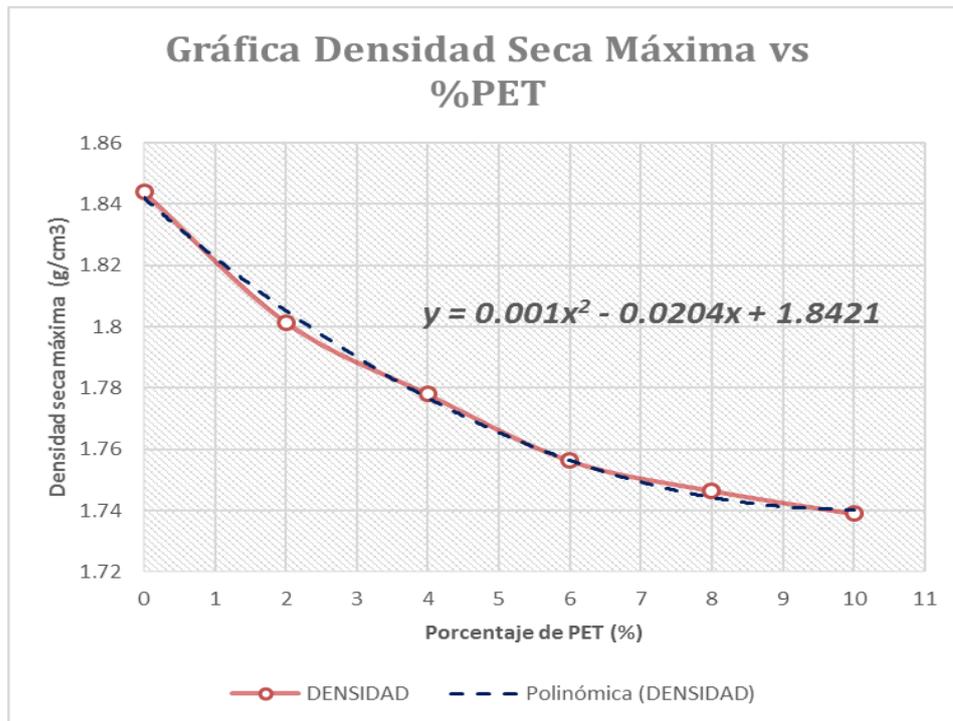


Figura 4.23: Curva Densidad Seca Máxima vs % de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

Tabla 4.9: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y DSM.

PRUEBA DE NORMALIDAD	
VARIABLE	SIGNIFICANCIA
PORCENTAJE DE PET UTILIZADO	0.961
DENSIDAD SECA MAXIMA DE SUELO	0.453

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

Como la significancia en las dos variables son mayores que 0.05 (0.961>0.05 y 0.453>0.05) se concluye que las variables tienen una distribución Normal, para lo cual el coeficiente de correlación a utilizar es el de Pearson.

Tabla 4.10: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y DSM.

PRUEBA DE CORRELACIÓN		
		Densidad Seca Máxima
Porcentaje de PET utilizado	Coefficiente de correlación de Pearson (r)	-0.958
	Significancia	0.003

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

El coeficiente de Pearson resulto -0.958 lo cual indica que hay una relación lineal negativa, esta se da cuando una variable disminuye conforme la otra se incrementa. Según la tabla 3.3 se concluye que hay una **Correlación negativa muy alta**.

- a) Probar la hipótesis para $p \neq 0$

Hipótesis Estadística:

$$H_0: p = p_0$$

$$H_a: p \neq p_0$$

H_0 = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de Proctor Modificado.

H_a = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de Proctor Modificado.

- b) nivel de significación “ α ”: $\alpha= 0.05$
 c) la regla de decisión es:

Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a

Si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a

$$p < \alpha$$

$$0.003 < \alpha$$

d) Conclusión:

Ya que $p < \alpha$, existe suficiente evidencia para afirmar que $p \neq 0$, es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora los resultados de la correlación encontrada. Por tal motivo se acepta la hipótesis alterna H_a : El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de Proctor Modificado.

4.3.2 Correlación del Contenido de Humedad Óptimo y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.

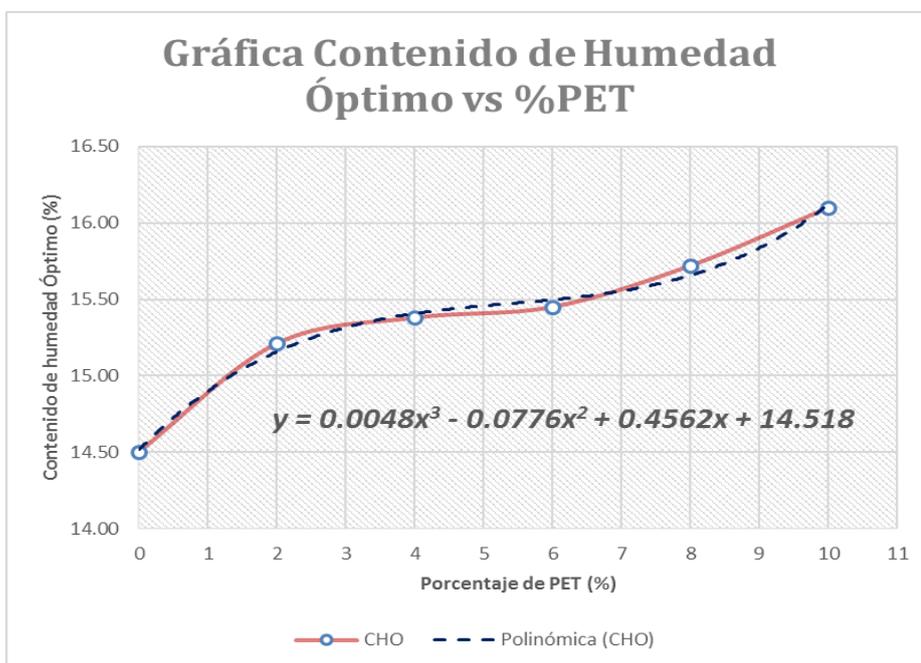


Figura 4.24: Curva Contenido Óptimo de Humedad vs % de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

Tabla 4.11: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y CHO.

PRUEBA DE NORMALIDAD	
VARIABLE	SIGNIFICANCIA
PORCENTAJE DE PET UTILIZADO	0.961
CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO	0.843

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

Como la significancia en las dos variables son mayores que 0.05 ($0.961 > 0.05$ y $0.843 > 0.05$) se concluye que las variables tienen una distribución Normal, para lo cual el coeficiente de correlación a utilizar es el de Pearson.

Tabla 4.12: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y CHO.

PRUEBA DE CORRELACIÓN		
		Contenido de Humedad Óptimo
Porcentaje de PET utilizado	Coefficiente de correlación de Pearson (r)	0.956
	Significancia	0.003

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

El coeficiente de Pearson resulto 0.956 lo cual indica que hay una relación lineal positiva, esta se da cuando una variable aumenta la otra se también incrementa. Según la tabla 3.3 se concluye que hay una **Correlación positiva muy alta**.

- a) Probar la hipótesis para $p \neq 0$

Hipótesis Estadística:

$$H_0: p = p_0$$

$$H_a: p \neq p_0$$

H_0 = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de Proctor Modificado.

H_a = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de Proctor Modificado.

- b) nivel de significación “ α ”: $\alpha = 0.05$
c) la regla de decisión es:

Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a

Si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a

$$p < \alpha$$

$$0.003 < \alpha$$

d) Conclusión:

Ya que $p < \alpha$, existe suficiente evidencia para afirmar que $p \neq 0$, es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora los resultados de la correlación encontrada en la tabla 4.10 (Correlación del % de PET y DSM) y por tal motivo se acepta la hipótesis alterna H_a : El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de Proctor Modificado.

4.3.3 Correlación del CBR a los 12 golpes de compactación al 100% de la máxima densidad seca y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.

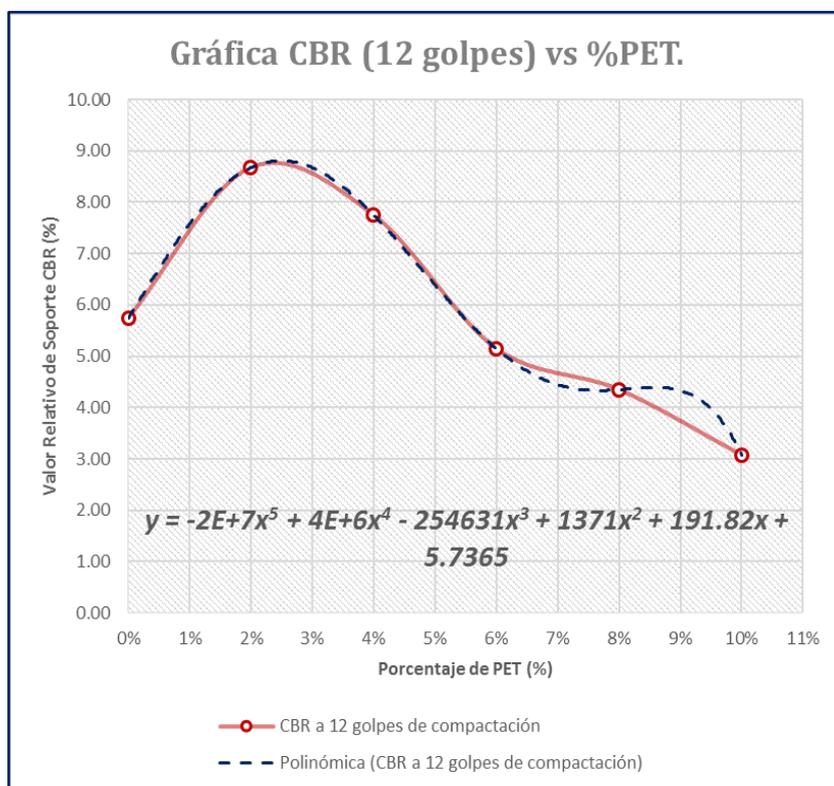


Figura 4.25: Gráfica de evolución del CBR a 12 golpes de compactación para diferentes porcentajes de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

Tabla 4.13: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y CBR a 12 golpes.

PRUEBA DE NORMALIDAD	
VARIABLE	SIGNIFICANCIA
PORCENTAJE DE PET UTILIZADO	0.961
CBR A 12 GOLPES DE COMPACTACIÓN	0.849

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

Como la significancia en las dos variables son mayores que 0.05 ($0.961 > 0.05$ y $0.849 > 0.05$) se concluye que las variables tienen una distribución Normal, para lo cual el coeficiente de correlación a utilizar es el de Pearson.

Tabla 4.14: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y CBR a 12 golpes.

PRUEBA DE CORRELACIÓN		
		CBR a 12 golpes de compactación
Porcentaje de PET utilizado	Coefficiente de correlación de Pearson (r)	-0.736
	Significancia	0.095

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

El coeficiente de Pearson resulto -0.736 lo cual indica que hay una relación lineal negativa, esta se da cuando una variable disminuye conforme la otra se incrementa. Según la tabla 3.3 se concluye que hay una **Correlación negativa alta**.

- a) Probar la hipótesis para $p \neq 0$

Hipótesis Estadística:

$$H_0: p = p_0$$

$$H_a: p \neq p_0$$

H_0 = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

H_a = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

b) nivel de significación “ α ”: $\alpha = 0.05$

c) la regla de decisión es:

Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a

Si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a

$$p > \alpha$$

$$0.095 > \alpha$$

d) Conclusión:

Ya que $p > \alpha$, existe suficiente evidencia para afirmar que $p \neq 0$, es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora los resultados de la correlación encontrada. Por tal motivo se acepta la hipótesis nula H_0 : El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

Además de ello, analizando los resultados obtenidos se podría prescindir de algunos porcentajes de PET propuestos (8 y 10% en este caso) y así tener una mejor función con una menor dispersión, haciendo la recomendación para futuras investigaciones que se considere este rango de porcentaje de PET (del 0% a 4%). Sin embargo, el contenido óptimo de PET en la presente investigación será el mismo (2%). Quedando de la siguiente forma:

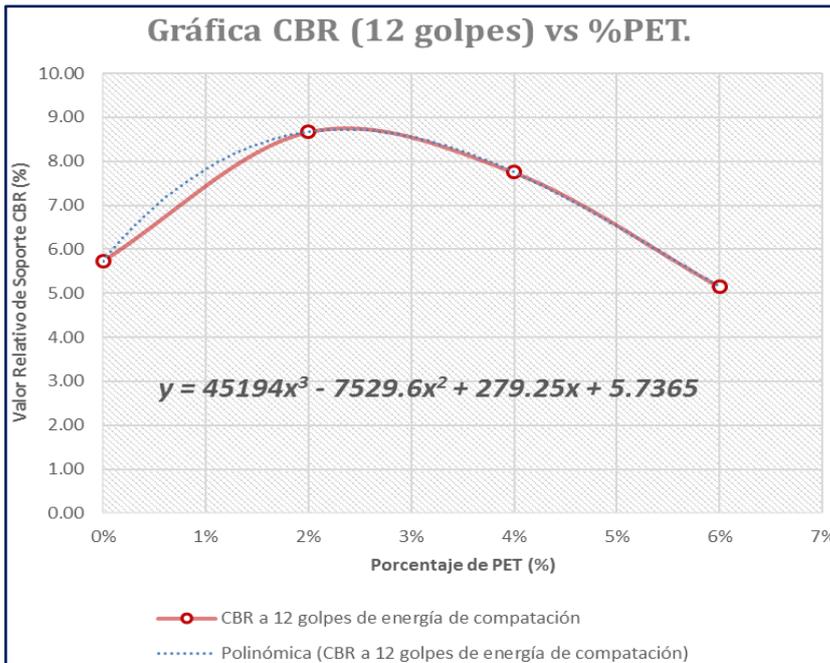


Figura 4.26: Curva mejorada de CBR a 12 golpes de compactación vs % de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

4.3.4 Correlación del CBR a los 25 golpes de compactación al 100% de la máxima densidad seca y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.

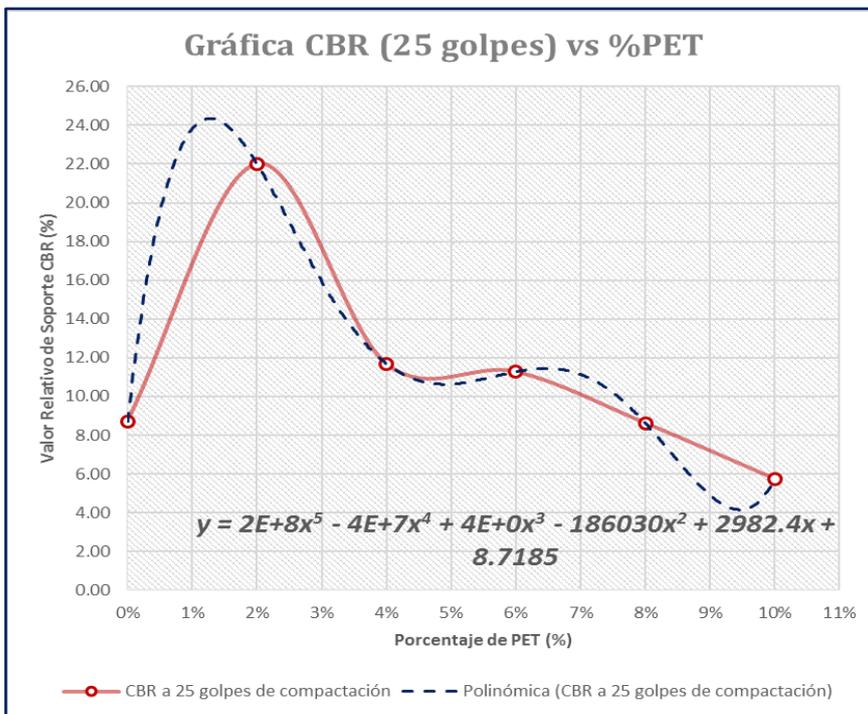


Figura 4.27: Gráfica de evolución del CBR a 25 golpes de compactación para diferentes porcentajes de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

Tabla 4.15: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y CBR a 25 golpes.

PRUEBA DE NORMALIDAD	
VARIABLE	SIGNIFICANCIA
PORCENTAJE DE PET UTILIZADO	0.961
CBR A 25 GOLPES DE COMPACTACIÓN	0.119

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

Como la significancia en las dos variables son mayores que 0.05 ($0.961 > 0.05$ y $0.119 > 0.05$) se concluye que las variables tienen una distribución Normal, para lo cual el coeficiente de correlación a utilizar es el de Pearson.

Tabla 4.16: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y CBR a 25 golpes.

PRUEBA DE CORRELACIÓN		
		CBR a 25 golpes de compactación
Porcentaje de PET utilizado	Coefficiente de correlación de Pearson (r)	-0.524
	Significancia	0.285

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

El coeficiente de Pearson resulto -0.524 lo cual indica que hay una relación lineal negativa, esta se da cuando una variable disminuye conforme la otra se incrementa. Según la tabla 3.3 se concluye que hay una **Correlación negativa moderada**.

- a) Probar la hipótesis para $p \neq 0$

Hipótesis Estadística:

$$H_0: p = p_0$$

$$H_a: p \neq p_0$$

H_0 = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

H_a = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

- b) nivel de significación " α ": $\alpha = 0.05$
- c) la regla de decisión es:

Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a

Si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a

$$p > \alpha$$

$$0.285 > \alpha$$

- d) Conclusión:

Ya que $p > \alpha$, existe suficiente evidencia para afirmar que $p \neq 0$, es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora los resultados de la correlación encontrada. Por tal motivo se acepta la hipótesis nula H_0 : El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

Además de ello, analizando los resultados obtenidos se podría prescindir de algunos porcentajes de PET propuestos (6, 8 y 10% en este caso) y así tener una mejor función con una menor dispersión, haciendo la recomendación para futuras investigaciones que se considere este rango de porcentaje de PET (del 0% a 4%). Sin embargo, el contenido óptimo de PET en la presente investigación será el mismo (2%). Quedando de la siguiente forma:

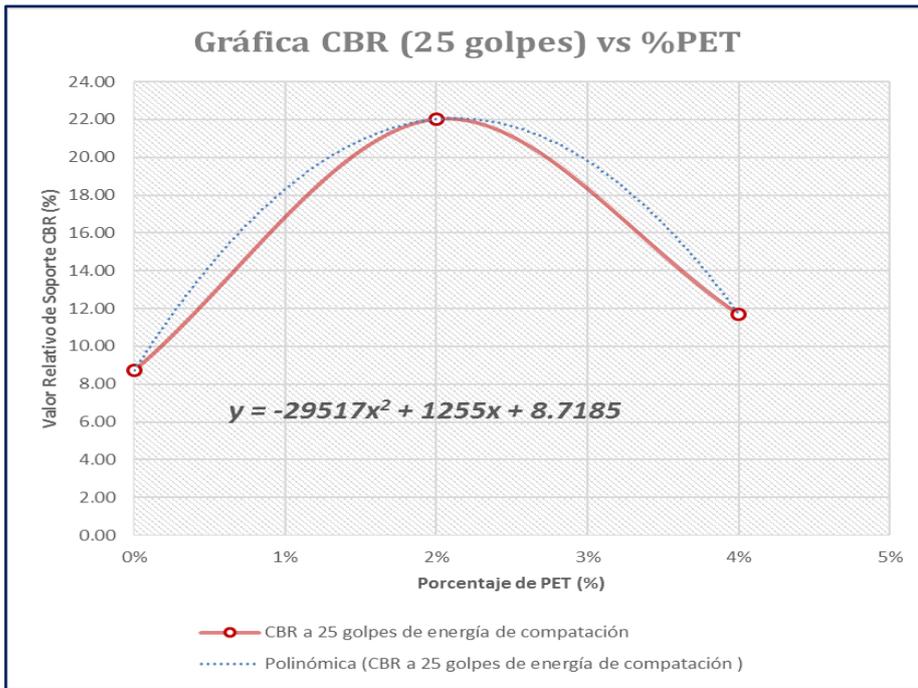


Figura 4.28: Curva mejorada de CBR a 25 golpes de compactación vs % de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

4.3.5 Correlación del CBR a los 56 golpes de compactación al 100% de la máxima densidad seca y el porcentaje de PET adicionado al suelo en estudio.

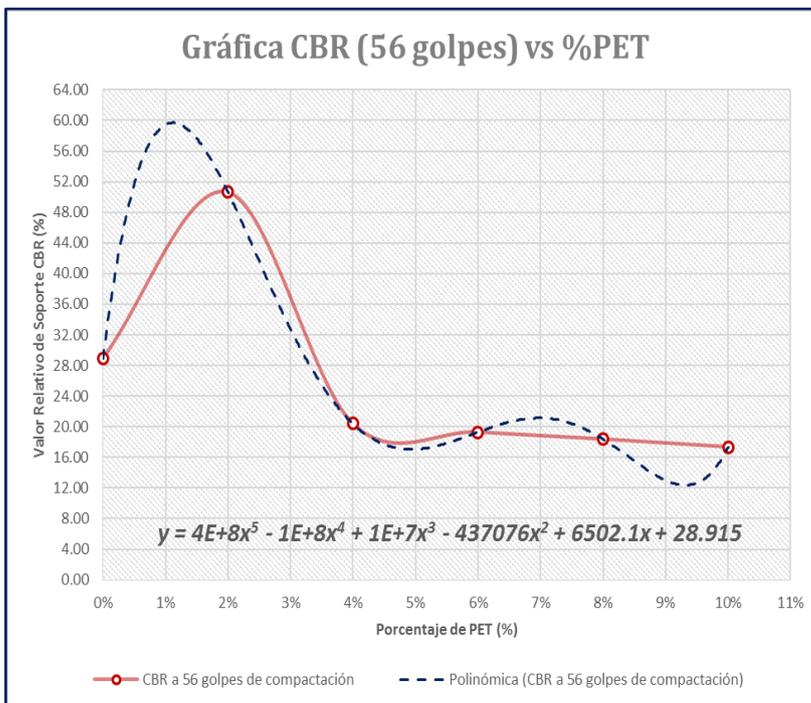


Figura 4.29: Gráfica de evolución del CBR a 56 golpes de compactación para diferentes porcentajes de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

Tabla 4.17: Análisis Estadístico de Normalidad del % de PET y CBR a 56 golpes.

PRUEBA DE NORMALIDAD	
VARIABLE	SIGNIFICANCIA
PORCENTAJE DE PET UTILIZADO	0.961
CBR A 56 GOLPES DE COMPACTACIÓN	0.011

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

Como la significancia en una de las variables es menor que 0.05 ($0.011 < 0.05$) se concluye que las variables tienen una distribución No Normal, para lo cual el coeficiente de correlación a utilizar es el de Spearman.

Tabla 4.18: Análisis Estadístico de Correlación del % de PET y CBR a 56 golpes.

PRUEBA DE CORRELACIÓN		
		CBR a 56 golpes de compactación
Porcentaje de PET utilizado	Coefficiente de correlación de Spearman (r_s)	-0.943
		Significancia
		0.005

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 23.0.

Fuente: Elaboración Propia.

El coeficiente de Spearman resulto -0.943 lo cual indica que hay una relación lineal negativa, esta se da cuando una variable disminuye conforme la otra se incrementa. Según la tabla 3.3 se concluye que hay una **Correlación negativa muy alta**.

- a) Probar la hipótesis para $p \neq 0$

Hipótesis Estadística:

$$H_0: p = p_0$$

$$H_a: p \neq p_0$$

H_0 = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador no influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

H_a = El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR.

b) nivel de significación “ α ”: $\alpha= 0.05$

c) la regla de decisión es:

Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a

Si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a

$$p < \alpha$$

$$0.005 < \alpha$$

d) Conclusión:

Ya que $p < \alpha$, existe suficiente evidencia para afirmar que $p \neq 0$, es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora los resultados de la correlación encontrada. **Por tal motivo se acepta la hipótesis alterna H_a : El tereftalato de polietileno como agente estabilizador influye en la mejora del comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos demostrado mediante en el ensayo de CBR al 100% de su densidad seca máxima.**

Además de ello, analizando los resultados obtenidos se podría prescindir de algunos porcentajes de PET propuestos (6, 8 y 10% en este caso) y así tener una mejor función con una menor dispersión, haciendo la recomendación para futuras investigaciones que se considere este rango de porcentaje de PET (del 0% a 4%). Sin embargo, el contenido óptimo de PET para la presente investigación será el mismo (2%). Quedando de la siguiente forma:

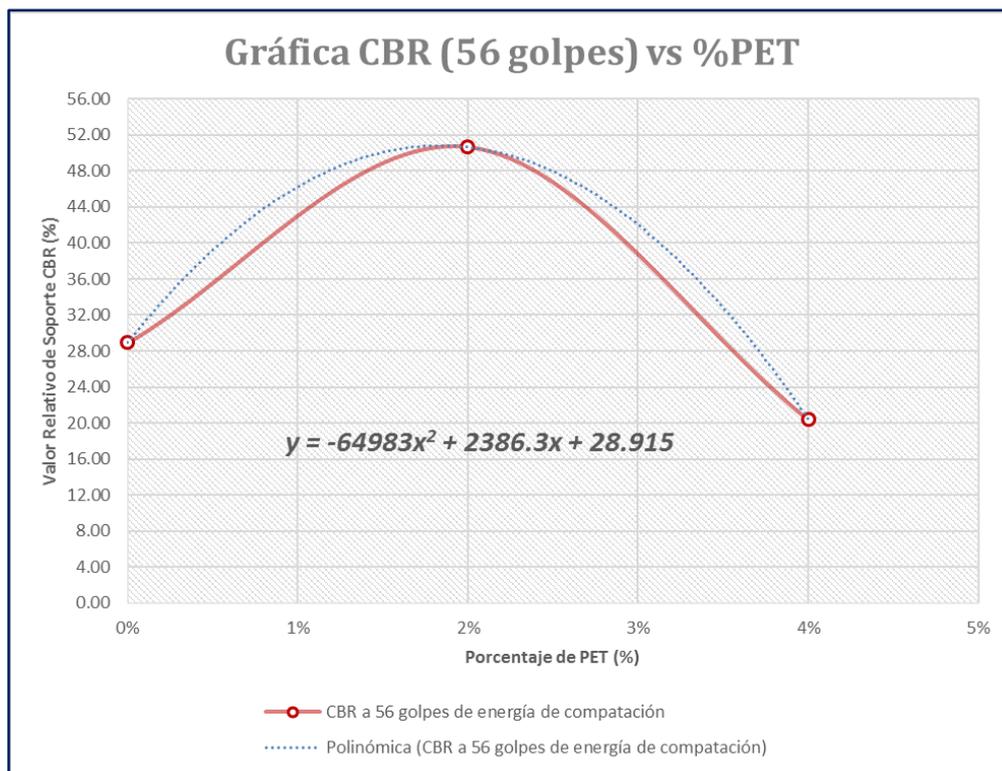


Figura 4.30: Curva mejorada de CBR a 56 golpes de compactación vs % de PET.

Fuente: (Elaboración Propia, 2018)

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

La estabilización de suelo fino adicionándole tereftalato de polietileno mejora notablemente las propiedades mecánicas de dicho suelo, considerándolo apropiado para su conformación de la capa de Sub Base y Subrasante de pavimentos flexibles. Por lo tanto, la investigación denominada “Efecto de la estabilización de suelos finos con tereftalato de polietileno como material de refuerzo en la estructura de pavimentos flexibles del distrito de Puno”, presenta las siguientes conclusiones específicas:

- El tereftalato de polietileno (PET) tiene excelente rigidez, alta resistencia al intemperismo y resistencia química. Por lo que considerando los resultados obtenidos del ensayo de CBR se concluye que el porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se adicionará a un suelo fino y logre así la mejora de las propiedades mecánicas de éste es el 2% de su peso seco.
- El efecto que produce el tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo de Proctor Modificado es negativo, ya que reduce progresivamente la densidad seca máxima, conforme se va adicionando más cantidad de PET, lo cual vuelve menos denso al suelo en estudio.
- El efecto que produce el tereftalato de polietileno como agente estabilizador en el comportamiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante el ensayo de CBR, referida al 100% de la densidad seca máxima es positivo, ya que incrementa el valor del CBR del tipo de suelo en estudio, logrando así el requerimiento mínimo requerido por la normativa peruana para los fines de estructura de un pavimento flexible (EG 2013).

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDACIONES

- Para tener información técnica especializada del efecto de la adición de PET en el suelo, se recomienda realizar más investigaciones para los diferentes tipos de suelos existentes en todo el territorio nacional.
- Para el uso del PET en la ingeniería, se recomienda a los proveedores del insumo mencionado, que este residuo debe estar libre de grasas y sustancias extrañas, debe ser triturado de manera uniforme tanto en su geometría como su tamaño y evitar la contaminación con otros tipos de plásticos.
- Se recomienda realizar tramos de prueba reales en pavimentos flexibles para evaluar su comportamiento funcional y estructural.
- Se recomienda a las entidades públicas y privadas responsables del cuidado y preservación del medio ambiente la implementación de laboratorios especializados con equipos sofisticados que garanticen las investigaciones realizadas en este rubro, así como también la capacitación y concientización moral y ambiental del personal encargado para dichos fines.
- Se pudo observar y experimentar personalmente la limitada producción y transformación del PET en la provincia de Puno, a nivel del requerimiento de los interesados. Por lo que se recomienda crear empresas especializadas y modernas que se dediquen exclusivamente al reciclado, estudio y transformación del residuo de PET. Visionando así en un futuro la producción de grandes cantidades de PET transformado que abastezcan los proyectos carreteros del país.
- Finalmente se recomienda realizar investigaciones similares a la actual pero con la diferencia de optar distintas formas geométricas del PET.

CAPÍTULO VII

7. REFERENCIAS

- Alesmar, L., Rendón, N., & Korody, M. (2008). *DISEÑOS DE MEZCLA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) – CEMENTO*. Caracas Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Departamento de Ingeniería Estructural, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería.
- Canavos C, G. (1988). *Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y Métodos*. México: Mc Graw-Hill.
- Comisión Ambiental Municipal CAM-Municipalidad Provincial de Puno. (2013-2018). *PLAN INTEGRAL DE GESTIÓN AMBIENTAL DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA PROVINCIA DE PUNO*. Puno-Perú: MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE PUNO.
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martínez, J. A. (2002). *MECÁNICA DE MATERIALES PARA PAVIMENTOS*. México: Instituto Mexicano Del Transporte.
- Gerencia de Medio Ambiente Y Servicios-Municipalidad Provincial de Puno, .. (2016). *VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS REAPROVECHABLES*. Puni-Perú: Municipalidad Provincial de Puno.
- Gómez Gómez, M., Danglot Banck, C., & Vega Franco, L. (2013). *Cómo seleccionar una prueba estadística*. México: Revista Mexicana de Pediatría.
- Hernández Sampieri, R., & Fernández Collado, C. (1998). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- Ibañez Quispe, V. (2009). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS*. Puno-Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.
- Lizárraga López, J. M. (2013). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES APLICANDO GEOMALLAS DE POLIPROPILENO COMO SISTEMA DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL*. Mexico: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO - PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA.
- Loayza Idme, M., & Rosas Sardón., A. (2013). *Estudio de Caracterización de*. Puno-Perú: Municipalidad Provincial de Puno.

- Lopez Ortiz, J. A. (2013). *SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON MATERIALES DE PLÁSTICO RECICLADO (PET)*. Antioquia-Colombia: Escuela de Ingenieria de Antioquia.
- M. Das, B. (2015). *FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA GEOTECNICA* (Vol. 4° edición). Mexico D.F.-Mexico: Cengage Learning.
- Mansilla Pérez, L., & Ruiz Ruiz, M. (2009). *Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster*. Lima-Perú: Universidad de Lima.
- Mendoza Mendiola & Guadarrama Ramos, J. (2008). *Bases y SubBases*. México: Unidad Zacatenco.
- Menéndez Acurio, R. (2009). *INGENIERÍA DE PAVIMENTOS*. Lima-Perú: ICG.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones DG 2018, P. (2018). *Manual de carreteras: Diseño Geometrico*. Lima-Perú: Ministerio de Transporte y Comunicaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones "EG". (2013). *Manual de Carreteras "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción" (EG-2013)*. Lima-Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima-Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de carreteras: Suelos, G. G. (2014). *Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Seccion suelos y Pavimentos*. Lima-Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio del Ambiente. (2012). *INFORME ANUAL DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES EN EL PERÚ GESTIÓN 2012*. Lima-Perú: Ministerio del Ambiente - MINAM.
- Ministerio del Ambiente. (2016). *Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2024*. Lima-Perú.
- Montejo Fonseca, A. (2002). *INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS*. Bogotá, Colombia: Agora Editores.
- Muñoz Perez, L. (2012). *ESTUDIO DEL USO DEL POLIETILENO TEREFTALATO (PET) COMO MATERIAL DE RESTITUCIÓN EN SUELOS DE BAJA CAPACIDAD DE CARGA*. Ciudad de Mexico-Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.

- Muzás Labad, F. (1979). *Congelación del terreno. El simposio internacional de Bochum*. Bochum-Alemania.: Sociedad Española de Mecánica de Suelos y Cimentaciones.
- Núñez Condori, A. (2016). *OPTIMIZACIÓN DE ESPESORES DE PAVIMENTOS CON APLICACIÓN DE GEO-SINTÉTICOS*. Puno-Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.
- Ortega Quiroz, J. (2008). *Análisis comparativo de las normas anteriores y actuales de materiales sub bases y bases*. México: Unidad Zacatenco.
- Pilco Villagra, J. A. (2012). *USO DE BOTELLAS RECICLABLES PET Y SU APLICACION EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES PARA SUELOS FRICCIONANTES EN LA CIUDAD DE PUNO-PERU 2011*. Puno-Peru: Universidad Nacional del Altiplano.
- Quispe Supo, F. (2014). *ESTABILIZACION DE SUELOS NO APTOS CON DESECHOS DE POLICLORURO DE VINILO PARA SU USO EN LA CONFORMACION DE LA CAPA BASE Y SUB BASE DE PAVIMENTOS*. Puno-Peru: Universidad Nacional del Altiplano.
- Restrepo, L., & González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de ciencias pecuarias*, 10.
- Romero Nuñez, A. R., & Ahumada Quimbay, N. D. (2014). *DESARROLLO AUTOSOSTENIBLE DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA ESCUELA “PORVENIR” CON LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL RECICLABLE*. Bogota-Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Sáez Castillo, A. J. (2012). *Apuntes de Estadística para Ingenieros*. Jaen-España: Departamento de Estadística e Investigación Operativa Universidad de Jaén.
- Sherwell Betancourt, G. F. (2014). *ESTUDIO DEL USO DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) COMO MATERIAL DE REFUERZO DE ESTRUCTURAS TÉRREAS CONFORMADAS POR SUELO FINO*. Ciudad de Mexico-Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Sociedad de la Industria de Plásticos, (. (1988). *Códigos de identificación de resinas de plásticos*. Washington.
- Suárez Tapia, M. F. (2012). *Interaprendizaje de estadística básica*. Ibarra-Ecuador: Universidad Técnica del Norte.
- Sunat Maximixe, C. (2008). *Club de Análisis de Riesgos. Gaseosas*. Lima-Perú.

Supo Pacori, W. D. (2015). *Mecánica de suelos II*. Juliaca-Puno-Perú: Universidad Andina
Néstor Cáceres Velásquez.

ANEXOS

- ANEXO A: CUADROS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN SOFTWARE IBM SPSS.
- ANEXO B: CONSTANCIA Y FICHAS DE OBSERVACIÓN DE ENSAYOS DE SUELOS EN LABORATORIO.
- ANEXO C: ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELO FINO ADICIONANDO PET.