



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



**ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELO CON CAL PARA EL
MEJORAMIENTO DE SUB BASE DEL TRAMO KM 08+000 AL
10+000 DE LA CARRETERA PUNO – MAÑAZO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JUAN VLADIMIR LIVISE BERRIO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2023



DEDICATORIA

A mi madre Natividad Berrio Huarahuara, por haberme formado con buenos valores, sentimientos y principios, lo cual me ha coadyuvado a seguir con mis anhelos y sueños, y en los momentos difíciles ha sabido guiarme, apoyarme y no claudicar, gracias mamita Natividad.

A mi padre Juan Crisóstomo Livise Quispe que desde el cielo ha sabido guiarme por el camino del bien.

A mi esposa Yesenia Pineda Tito e hijas Yamila y Ariana, los pilares de mi vida sin su apoyo condicional y motivación, no habría podido lograr este proyecto las amo mis princesas.

A mis hermanos Elizabeth, Félix, Roy y Gilmar, por su constante apoyo y respaldo.



AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Del Altiplano, alma mater de los Puneños, a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por haberme acogido durante mi formación académica, a los docentes Ingenieros Civiles por su constante dedicación, enseñanza y su ardua tarea en la formación de los futuros ingenieros.

A mi Asesor Ingeniero Mariano Roberto García Loayza, por haberme guiado, brindado oportunamente su enseñanza, su conocimiento, su capacidad y por su paciencia durante todo el proyecto de tesis.

A mis jurados Ingenieros Cesar Edwin Guerra Ramos, Samuel Huaquisto Cáceres y Fausto Ponciano Mamani Mamani, por haberme guiado en el desarrollo de mi proyecto de tesis.

A mis compañeros de la escuela profesional de ingeniería civil por disfrutar de su compañía durante nuestra formación académica, en especial a mi amigo Omar L. Javier Sucari, por su constante apoyo.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INDICE DE ACRONIMOS

RESUMEN 15

ABSTRACT..... 16

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 20

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 23

1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN..... 23

Hipótesis General..... 23

Hipótesis Especifico..... 24

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... 24

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 26

Objetivo General 26

Objetivos Específicos..... 26

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 MARCO TEÓRICO..... 27

2.1.1 Antecedentes 27

2.2 MARCO CONCEPTUAL..... 28

2.2.1 Estructura De Un Pavimento..... 28



2.2.2	Fallas de pavimentos	29
2.2.3	Definición Y Conceptos Generales	33
2.2.4	calidad de agregados	34
2.2.5	Subbase granular	35
2.2.6	Descripción de ensayos de suelos para control de calidad de la subbase	37
2.2.7	Contenido de humedad.....	37
2.2.8	Análisis granulométrico por tamizado	39
2.2.9	Índices de consistencia.....	41
2.2.10	Índice Plástico	46
2.2.11	Clasificación de los suelos	47
2.2.12	Proctor modificado.....	55
2.2.13	Valor relativo de soporte (CBR)	59
2.2.14	Ensayo de Abrasión.....	63
2.2.15	Ensayo de penetrómetro dinámico ligero (DPL)	67
2.2.16	La cal.....	71
2.2.17	Clases de cal.....	72
2.2.18	Fabricación y usos de la cal	72
2.2.19	Características físicas de la cal.....	76
2.2.20	Propiedades físicas de la cal.....	76
2.2.21	Características químicas de la cal.	77
2.2.22	Propiedades químicas de la cal.	78
2.2.23	Materiales usados para la estabilización de suelos con cal	79
2.2.24	Propiedades de los suelos estabilizados con cal.....	80
2.2.25	Mejoramiento de suelos	81
2.2.26	Sustitución de material.....	81
2.2.27	Mezclas de suelos.....	82
2.2.28	Mezclas con cal	82



2.2.29 Estabilización de suelos	83
2.2.30 Suelos estabilizados con cal	84

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO	87
3.2 PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO	87
3.3 PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO.	88
3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA	93
3.4.1 Población.....	93
3.4.2 Muestra.....	93
3.5 DISEÑO ESTADÍSTICO.....	94
3.5.1 Prueba De Hipótesis	94
3.5.2 Correlación	94
3.5.3 Nivel De Significancia O Significación	96
3.6 PROCEDIMIENTO	97
3.6.1 Ensayo de caracterización	97
3.6.2 Ensayo de comportamiento	97
3.6.3 Trabajo preliminar en la vía Puno-Mañazo.....	115
3.6.4 Trabajo de campo en las canteras.....	118
3.6.5 Ensayo de penetrómetro dinámico ligero (DPL)	121
3.7 LAS VARIABLES	124
3.7.1 Tipo y diseño de investigación.....	125
3.7.2 Diseño	125
3.7.3 Matriz de consistencia.....	126
3.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	127
3.8.1 Calculo de valor relativo de soporte (CBR) cantera de Alto Puno	127



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	RESULTADOS	133
4.1.1	Situaciones Preliminares De Las Canteras.....	133
4.1.2	Cálculos de los ensayos y pruebas realizadas	133
4.1.3	Análisis De Los Resultados	139
4.2	DISCUSIÓN.....	146
4.2.1	Estabilización Del Suelo De Las Canteras Con Cal.....	146
4.2.2	Ensayo De Proctor Modificado.....	146
4.2.3	Ensayo Del Valor Relativo De Soporte (CBR).....	151
4.2.4	Hipótesis estadística	162
4.2.5	Prueba De Hipótesis Para La Correlación.....	163
4.2.6	Correlaciones Para La Cantera De Alto Puno.....	165
4.2.7	Correlaciones Para La Cantera De Salcedo.....	168
4.2.8	Prueba De Hipótesis Para La Cantera De Alto Puno	170
4.2.9	Análisis De Costo Unitario Para La Estabilización Química Con Cal.	177
4.2.10	Análisis de costo unitario de los componentes Cal, Cantera y Agua....	177
V.	CONCLUSIONES.....	186
VI.	RECOMENDACIONES.....	188
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	189
ANEXOS.....		193

ÁREA : Mejoramiento de suelos.

TEMA: Estabilización de suelos.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Geotecnia.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 06 de enero del 2023



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Estructura de un pavimento flexible.	29
Figura 2	Estructura de un pavimento rígido.	29
Figura 3	Falla o agrietamiento superficial.	30
Figura 4	Falla o agrietamientos profundos.	31
Figura 5	Por agrietamiento profundo desplazamiento lateral.	32
Figura 6	Agrietamiento por repavimentación o reflejos.	32
Figura 7	Límites de Atterberg.	41
Figura 8	Ensayo de Limite Liquido.	44
Figura 9	Carta de plasticidad.	54
Figura 10	Equipo de Ensayo Proctor Modificado.	58
Figura 11	Densidad Máxima Seca y contenido de humedad óptimo.	59
Figura 12	Equipos y materiales para el ensayo de CBR.	63
Figura 13	Máquina De Abrasión De Los Ángeles.	65
Figura 14	Equipo Penetrómetro Dinámico Ligero (DPL).	69
Figura 15	Cantera de piedra caliza.	73
Figura 16	Calcinación de la Cal.	73
Figura 17	Proceso final de la obtención de la cal.	74
Figura 18	Efectos de la cal sobre suelos arcillosos.	79
Figura 19	Ubicación Geográfica de Estudio.	87
Figura 20	Ubicación de cantera utilizado en la presente investigación.	89
Figura 21	Ubicación de la Cantera Alto Puno.	91
Figura 22	Ubicación de la Cantera de Salcedo.	92
Figura 23	Tipos de correlaciones “r”.	95
Figura 24	Ensayo de contenido de humedad.	99
Figura 25	Lavado de la muestra de suelo por el tamiz N° 200.	100
Figura 26	Ensayo de granulometría por tamizado.	100
Figura 27	Ensayo De Limite Liquido.	102
Figura 28	Ensayo De Limite Plástico.	103
Figura 29	Tamizado de la muestra de suelo en los tamices 1”, ¾”, ½” y 3/8”.	104
Figura 30	Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los Ángeles.	105
Figura 31	Tamizado la muestra de suelo por el tamiz N° 12.	106



Figura 32	Tamizado de la muestra de suelo por los tamices $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ ", y N° 4.....	107
Figura 33	Registro de las dimensiones D/h y peso del molde de Proctor modificado.	108
Figura 34	Ensayo De Proctor Modificado.....	109
Figura 35	Mezcla de la muestra de suelo natural con el contenido de humedad óptimo.	111
Figura 36	Ejecución del ensayo de CBR.....	112
Figura 37	Saturación de los moldes de CBR durante 96 horas y lecturas con el dial.113	
Figura 38	Lecturas del dial de carga.	114
Figura 39	Geolocalización de calicatas	116
Figura 40	Extracción de muestra de suelo Calicata N° 1 Km 08 + 750.....	117
Figura 41	Extracción de muestra de suelo Calicata N° 2 Km 09 + 300.....	118
Figura 42	Ubicación de las Calitas C-1, C-2 y C-3.....	120
Figura 43	Exploración, muestreo y extracción material de la Cantera Alto Puno.	120
Figura 44	Dimensiones del equipo DPL	122
Figura 45	Procedimiento de ensayo de DPL.....	123
Figura 46	Curva de Compactación Máxima Densidad Seca Y Contenido De Humedad Óptimo.	129
Figura 47	Curva Granulométrica De La Cantera De Alto Puno.	133
Figura 48	Curva Granulométrica De La Cantera De Salcedo	134
Figura 49	Curva Granulométrica de la vía Puno Mañazo.	134
Figura 50	Verificación entre la Curva Granulométrica de la Cantera Alto Puno y el nivel especificado por la EG 2013 con la Gradación "A".	139
Figura 51	Verificación entre la Curva Granulométrica de la Cantera Salcedo y el nivel especificado por la EG-2013 con la Gradación "A".	140
Figura 52	Verificación entre la Curva Granulométrica del material de la vía Puno Mañazo y el nivel especificado por la EG-2013 con la Gradación "A". ...	141
Figura 53	Densidad Máxima Seca del material de Cantera Alto Puno con adición de Cal.	146
Figura 54	Contenido de Humedad Óptimo(CHO) del material de Cantera Alto Puno con el aditamento de Cal.....	147
Figura 55	Resumen de las curvas de compactación de la Cantera de Alto Puno.....	148
Figura 56	Evolución de Máxima Densidad Seca de la Cantera de Salcedo.....	149



Figura 57	Contenido de Humedad Óptimo(CHO) para la mezcla del material de la Cantera Salcedo con y sin la adición de cal.	150
Figura 58	Resúmenes de las Curvas de Compactación Cantera Salcedo.....	151
Figura 59	Valor Relativo de Soporte (CBR) a los 12, 25 y 56 golpes al 100% de la Densidad Máxima Seca para la mezcla del material de la cantera Alto Puno con la adición de cal y sin cal.	152
Figura 60	Resúmenes de las Curvas de Compactación del Valor Relativo de Soporte(CBR) y Densidad Seca de la Cantera Alto Puno.	154
Figura 61	Valor Relativo De Soporte(CBR) a los 12, 25 y 56 golpes al 100% de la Densidad Máxima Seca para la mezcla del material de la Cantera de Salcedo con y sin la adición de Cal.	155
Figura 62	Síntesis de las curvas de compactación del Valor Relativo de Soporte(CBR) VS Densidad Seca de la Cantera Salcedo.	157
Figura 63	Resumen del ensayo DPL profundidad VS número de golpes.....	159
Figura 64	Curva de resumen de correlación DPL y CBR.	162
Figura 65	Correlación del Índice de Plasticidad y Cal (%) adicionado a la muestra de suelo.	165
Figura 66	Correlación del Valor Relativo de Soporte (CBR) a los 56 golpes de compactación de la Máxima Densidad Seca al (100%), para el suelo natural y el suelo estabilizado con Cal.....	166
Figura 67	Correlación de la Densidad Máxima Seca para la mezcla del material natural Cantera Alto Puno con porcentaje de Cal agregado al suelo.	167
Figura 68	Correlación de la Expansión a los 56 golpes de compactación con respecto al porcentaje de Cal agregado al suelo.....	168
Figura 69	Correlación del Índice de Plasticidad y el 4% de Cal agregado a la muestra de suelo.	168
Figura 70	Correlación del Valor Relativo de Soporte (CBR) a los 56 golpes de compactación de la Densidad Máxima Seca al (100%), para el suelo natural y el suelo estabilizado con 4% de Cal.....	169
Figura 71	Correlación de la Densidad Máxima Seca para la mezcla del suelo natural con la adición del 4% de Cal.	169



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Fallas en pavimentos flexibles	33
Tabla 2	Ensayo de calidad de agregados	34
Tabla 3	Requerimientos granulométricos para Subbase granular.....	36
Tabla 4	Subbase Granular Requerimientos de Ensayos Especiales.....	36
Tabla 5	Cantidad de muestra para el ensayo de contenido de humedad.....	38
Tabla 6	Tamaño de grano.....	48
Tabla 7	Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras.....	50
Tabla 8	Clasificación de suelos por el sistema SUCS.	55
Tabla 9	Valores de carga unitaria	61
Tabla 10	Clasificación de los suelos de acuerdo al valor de CBR.....	62
Tabla 11	Peso de agregado y número de esferas para agregados gruesos hasta de 1 ½”	66
Tabla 12	Resumen de expresiones para correlacionar el número DPL con otros valores	70
Tabla 13	Cantidad de muestra de suelo la cantera de Alto Puno, Salcedo y Calicata en la vía.....	93
Tabla 14	Relación del coeficiente de correlación de Pearson.....	96
Tabla 15	Resumen de expresiones para correlacionar el número DPL con CBR.....	124
Tabla 16	Matriz de consistencia.....	126
Tabla 17	Datos densidad de suelo húmedo del ensayo Proctor	127
Tabla 18	Datos De La Densidad Del Suelo Seco y contenido de humedad.	129
Tabla 19	Datos para el cálculo densidad de suelo húmedo y seco	130
Tabla 20	Calculo de expansión de CBR	131
Tabla 21	Calculo del CBR del suelo.....	131
Tabla 22	Resumen De Límites de Atterberg de la Cantera de Alto Puno	135
Tabla 23	Resumen De Límites de Atterberg de la Cantera de Salcedo.	135
Tabla 24	Resumen De Límites de Atterberg de la Muestra de la vía Puno Mañazo. 135	
Tabla 25	Proporción de desgaste del material (%) de la cantera de Alto Puno sin la adición de Cal.	136
Tabla 26	Detalle de la Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo del material de Cantera de Alto Puno sin la adición de Cal.	136



Tabla 27	Detalle de la Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo del material de Cantera de Salcedo sin la adición de Cal.	136
Tabla 28	Detalle de la Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo del material de la vía.	137
Tabla 29	Detalle de la Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo del material de la vía Puno Mañazo.	137
Tabla 30	Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de Cantera de Alto Puno sin la adición de Cal.	137
Tabla 31	Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de Cantera de Salcedo sin la adición de Cal.	138
Tabla 32	Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de subbase de la vía Puno Mañazo.	138
Tabla 33	Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de subbase de la vía Puno Mañazo.	138
Tabla 34	Verificación del Índice de Plasticidad de la Cantera Alto Puno con la norma EG-2013.	142
Tabla 35	Verificación del Índice de Plasticidad de la Cantera Salcedo con la norma EG-2013.	142
Tabla 36	Verificación de la proporción de desgaste de Abrasión de la Cantera Alto Puno con la EG-2013.	143
Tabla 37	Verificación del Valor Relativo de Soporte de la Cantera Alto Puno (suelo natural) con la EG 2013.	144
Tabla 38	Verificación del Valor Relativo de Soporte de la Cantera Salcedo con la EG2013.	144
Tabla 39	Verificación del Valor Relativo de Soporte del Material de la subbase de la vía Puno Mañazo con la EG 2013.	145
Tabla 40	Verificación del Valor Relativo de Soporte del Material de la subbase de la vía Puno Mañazo con la EG 2013.	145
Tabla 41	Densidad Máxima Seca del material de Cantera Alto Puno con adición de cal.	146
Tabla 42	Contenido de Humedad Óptimo(CHO) del material de Cantera Alto Puno con la adición de Cal.	147
Tabla 43	Densidad Máxima Seca del material de Cantera Salcedo con adición de cal.	149



Tabla 44	Contenido de Humedad Óptimo(CHO) para la mezcla del material de la Cantera Salcedo con la adición de Cal y sin Cal.	150
Tabla 45	Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de Cantera Alto Puno con y sin adición Cal al 100% de la Densidad Máxima Seca.	151
Tabla 46	Expansión de la cantera de Alto Puno expresado en % con respecto a 12, 25 y 56 golpes con 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de Cal.	153
Tabla 47	Valor Relativo de Soporte(CBR) del material de Cantera- Salcedo sin cal y con la adición de cal al 100% de la Densidad Máxima Seca.	155
Tabla 48	Expansión de la cantera de Salcedo expresado en % con respecto a 12, 25 y 56 golpes para 0% y 4% de Cal.	156
Tabla 49	Datos del ensayo DPL in situ.	158
Tabla 50	Resultados del ensayo DPL in situ.	160
Tabla 51	Resumen de correlación DPL y CBR.	161
Tabla 52	Tipificación de hipótesis	163
Tabla 53	Variable del Índice de Plasticidad.	172
Tabla 54	Variable del Valor Relativo de Soporte (CBR)	174
Tabla 55	Variable de la Densidad Máxima Seca	176
Tabla 56	La dosificación por 1 m ³	179
Tabla 57	Análisis De Precios Unitarios De La Cantera de Alto Puno.	181
Tabla 58	Propuesta de presupuesto para el mejoramiento a nivel de subbase de la vía Puno Mañazo.	185



INDICE DE ACRONIMOS

AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM. American Society for Testing and Materials

CBR. Valor Relativo De Soporte

DIN. Instituto Aleman De Normalizacion

DPL. Penetrometro Dinamico Ligero

EG. Especificaciones Generales

I.P.. Indice De Plasticidad

L.L. Limite Liquido

L.P. Limite Plastico

MTC. Ministerio De Transportes Y Comunicaciones

NTP. Norma Tecnica Peruana

S.U.C.S. Sistema Unificado de Clasificacion de Suelos



RESUMEN

Las obras viales se presenta diferentes dificultades al momento de realizar la ejecución del proceso constructivo de una carretera, siendo un factor de estos la disponibilidad de canteras al momento de realizar el movimiento de tierras para la conformación del pavimento (base, subbase y subrasante), generalmente se utiliza los materiales de las canteras de las zonas de trabajo los cuales habitualmente no obedecen con los estándares y condiciones mínimas requeridas por la norma del MTC (EG-2013). La investigación se concentra en la conducta de las propiedades mecánicas del suelo de la cantera de Alto Puno, el objetivo general determinar la óptima proporción y porcentaje de cal, a fin de estabilizar el suelo agregando cal para el mejoramiento del valor relativo de soporte de la subbase del tramo KM. 08+000 al 10+000 de la carretera Puno – Mañazo, la realización del proyecto fue con un diseño de investigación experimental, el muestreo no probabilístico y recopilación de datos por análisis. Concluyendo que las características y propiedad mecánica del suelo de la Cantera Alto Puno son: clasificación de suelos(S.U.C.S) de tipo GP (grava mal graduada), L.L.:29.46%, L.P.:25.48% y el I.P.:3.98%, además se determinó el CBR de 30%, valorando el suelo preliminarmente como no apto para la capa subbase, después de haber estabilizado el suelo agregando cal al 2%, 4%, 6% y 8%, se tuvo variaciones efectivas en su propiedad mecánica aumentando el CBR al 73%, 104%, 80% y 71% respectivamente, asimismo se determinó la óptima proporción y porcentaje de cal siendo este el 4% y valor relativo de soporte de (CBR) 104%, de esta manera los resultados obtenidos se localizan entre las condiciones de la norma del MTC.

Palabra clave: Sub base, cal, CBR, estabilización, suelo.



ABSTRACT

Road works present different difficulties at the time of carrying out the construction process of a highway, one of these being the availability of quarries at the time of carrying out the earthworks for the formation of the pavement (base, subbase and subgrade), Generally, materials from quarries in the work areas are used, which usually do not comply with the standards and minimum conditions required by the MTC standard (EG-2013). The investigation focuses on the behavior of the mechanical properties of the soil of the Alto Puno quarry, the general objective is to determine the optimal proportion and percentage of lime, in order to stabilize the soil by adding lime to improve the relative support value of the subbase of section KM. 08+000 to 10+000 of the Puno - Mañazo highway, the project was carried out with an experimental research design, non-probabilistic sampling and data collection by analysis. Concluding that the characteristics and mechanical property of the soil of the Alto Puno Quarry are: soil classification (S.U.C.S) of type GP (poorly graded gravel), L.L.:29.46%, L.P.:25.48% and the I.P.:3.98%, it was also determined the CBR of 30%, preliminarily assessing the soil as unsuitable for the subbase layer, after having stabilized the soil by adding lime at 2%, 4%, 6% and 8%, there were effective variations in its mechanical property increasing the CBR at 73%, 104%, 80% and 71% respectively, likewise the optimal proportion and percentage of lime was determined, this being 4% and relative support value of (CBR) 104%, in this way the results obtained are located between the conditions of the MTC standard.

Keywords: Subbase, lime, CBR, stabilization, soil.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, actualmente diferentes países a nivel internacional buscan estrategias, técnicas y soluciones para ser competitivos en el rubro de la construcción de vías, sin embargo, son escasos los que consiguen el desarrollo de sus proyectos y metas, esto generalmente ocurre en la reincidencia de la utilización de materiales e insumos no aptos para la obtención de una infraestructura vial, asimismo el proceso constructivo de una carretera los cuales se utilizan como medio transporte es vital tener una vía de calidad, con materiales aprobados y con los estándares mínimos requeridos por las normas vigentes. (Alarcon, Jimenez, & Benitez, 2020)

En México, en el estudio realizado por Hernández (2021), señala las urgencias de comunicación y transporte que demandan los estados en progreso para satisfacer las distintas necesidades de sus poblaciones, como social, economía, ambiental y de transporte; es menester tener una infraestructura suficientemente duradera a fin de satisfacer dicha demanda y que avale la fluidez y recorrido de los vehículos durante el transcurso y duración de la obra. Las exploraciones de las vías generalmente se ubican sobre suelos escasamente tratables en cuanto al relieve y a la calidad de los materiales, para el asentamiento de la estructura del pavimento, por tanto, se han desarrollado distintas técnicas, el uso de diferentes materiales y máquinas para distintos trabajos respectivamente, teniendo una solución a la problemática de las vías. (pág. 1)

A nivel nacional, la realidad no es ajena en nuestro país se ha observado que los pavimentos tienen distintas fallas los cuales hacen que las vías sean intransitables esto sucede en diferentes provincias del país, como señala Carranza (2021) en su tesis elaborado en la región de Cajamarca, mostrando la situación y problemática de la vía La



Capilla – Cedro Pampa, el cual ha detectado diferentes fallas como grietas, hundimientos, bacheos, fisuras, deslizamientos, etc. Esto a consecuencia de la una mala estabilización de los suelos, la falta de ensayos, pruebas y estudios previos y la ausencia de emplear los depósitos de suelos provenientes de la zona.

A nivel local, en nuestro medio local también existen las problemáticas descritas en los párrafos anteriores, como lo señala QUISPE (2014) en su investigación desarrollado en el distrito de Puno, desarrollando sobre las exigencias del MTC en cuanto a la utilización de elementos reciclables como el policloruro de vinilo (agente estabilizante), para lo cual ha mezclado con diferentes canteras con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas y características del suelo de las canteras, estudio ejecutado para la base y subbase de un pavimento, asimismo realizando esta investigación ha contribuido con el medio ambiente, el aprovechamiento y utilización de materiales (canteras) cercanos a las obras.

En nuestro entorno local ciudad de Puno existen diferentes canteras de los cuales los más empleados son para la construcción de obras viales, los mismos que conforman las capas de Subbase y base, estas canteras son Alto Puno y Salcedo, en la exploración y al efectuar los análisis preliminares del comportamiento de estos suelos de las canteras inicialmente son consideradas no aptas, principalmente el valor relativo de soporte no satisface con lo que indica las especificaciones generales de la MTC (EG 2013), suelo que compondrán la subbase como componente de las partes de un pavimento.

Con este alcance la exploración se empleará como patrón el material de la cantera de Alto Puno ubicada dentro de la jurisdicción Puno, además se tomó la cantera de Salcedo para contrastar los efectos de la investigación.



La investigación muestra una alternativa de mejoramiento y estabilización con cal aditivo que se será utilizado como agente estabilizante en su forma artesanal y natural, insumo de la jurisdicción del distrito de Puno, “actualmente en la construcción de obras viales genera grandes explanaciones, por lo que es fundamental disminuir y suplir al máximo permisible movimientos de tierras teniendo a consideración los factores económicos, ambiental y técnica, además cada vez se hace más difícil optimizar los procesos constructivos en cuestiones de costo, plazo y calidad. La necesidad de terrenos para préstamos y vertederos puede llegar a ser el factor determinante en esta optimización” (ANCADE, ANTER, & IECA, 2010). En ese sentido se hace cada vez más inevitable emplear los materiales que se ubican directamente en el área de trabajo de una obra vial, para ello es necesario realizar estudios previos y pruebas en el laboratorio de suelos a fin especificar las propiedades mecánicas y características de los suelos, así optar los tratamientos y medidas necesarias para conseguir la durabilidad, transitabilidad y la utilidad de la obra a largo plazo a un costo económico y moderado. El proceso, mejoramiento y estabilización con cal de los suelos es un recurso y alternativa atrayente desde diversos ámbitos (social, económico, ambiental y otros), principalmente para suelos plásticos, sin embargo, en la investigación ejecutada se ha evidenciado deducciones propicias para la cantera de Alto Puno siendo este, un tipo de suelo granular al ser mezclado con la cal se ha notado que su propiedad mecánica del valor relativo de soporte ha aumentado de manera gradual.

El proyecto está compuesto por seis capítulos, debidamente titulados y subtitulados de acuerdo a los niveles, a fin de que los lectores tengan la facilidad de comprensión y entendimiento.



1.1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

A un nivel internacional, Según Chakraborty y Nair (2017), debido a las amplias problemáticas del medio ambiente que se vienen suscitando en las últimas décadas y teniendo el pensamiento del cuidado del ecosistema, se hace necesario emplear materiales en su forma natural o teniendo pocas alteraciones, utilizar y aprovechar adecuadamente los recursos aptos y adecuados dentro del área de la obra. Usualmente esta idea no es factible llevarlo a cabo, puesto que la mayoría de los suelos de los estados de México, contiene inmensas y abundantes depósitos de arcillas como es el caso de la ciudad de Querétaro, por lo que estos suelos no pueden ser aprovechados en su forma original para ser empleados como componentes de un pavimento, trayendo como consecuencia la eliminación de este suelo y por ende se deben explotar otras canteras de características y propiedades mecánicas que se rigen con las exigencias mínimas de la normativa actual. Estas actividades de eliminación, aprovechamiento de canteras y exportación de material sobrellevan a realizar distintos esfuerzos y empleo de recursos los cuales pueden ser destinados a otros fines. La problemática ambiental y de manejo de recursos debe ser mitigada o al menos minimizada, haciendo uso de materiales in situ a fin de establecer un tratamiento de estabilización con algún agente estabilizante a fin suplir las capas estructurales del pavimento.

A un nivel nacional, según Coronado Zuloeta (2020), indica que analizando los diferentes problemas que vienen pasando los proyectos de infraestructura vial, refiere las causas que generan espacios vacíos y baja capacidad del CBR de los suelos, es la ausencia de un estudio previo en el tramo o zona de intervención, en donde se analicen las características y propiedades físicas y mecánicas que tiene el suelo y las condiciones del entorno que permita tomar decisiones correctas antes de la ejecución de la obra. Además, señala que, si las entidades responsables no atienden la presente problemática de estudio.



A nivel local, según Velarde Del Castillo (2015), en su investigación realizado en la ciudad de Puno, específicamente en el interior del Lago Titicaca, a fin de valorar su resistencia a la compresión simple de materiales arcillosos empleando como agentes estabilizantes cal y cemento, dando importancia al medio ambiente a fin de minimizar y crear nuevos prestamos y verteros, asimismo la reutilización de materiales con un proceso apropiado de estabilización, con precio económico y medio ambiental sostenible, para ello ha realizado la estabilización con cal y cemento evaluando ambos componentes simultáneamente.

Descripción del problema de investigación, la vía entre las ciudades Puno - Mañazo, actualmente se encuentra asfaltada, sin embargo, por la mayor fluidez de tránsito de vehículos livianos y pesados está viene siendo afectado, encontrándose baches, aberturas, grietas y otras fallas. Por tanto, el problema podría ser la conformación de los estratos (base, subbase y sub rasante), a nivel subbase la causa se infiere que es la calidad del material, baja compactación y contaminación del material con las terracerías, a modo que esta investigación se orienta en el estudio de la capa de subbase, el mismo que estaría no apta con las exigencia mínimas de la norma del MTC, una de las alternativas de mejoramiento y estabilización indicada en la norma, es mediante un proceso de mejoramiento químico con el uso de cal, el cual será estudio central de la investigación con el propósito de establecer el porcentaje y porción óptima de cal para el mejoramiento del valor relativo de soporte (CBR), para esto sea extraído material que ha sido utilizado en la vía, realizando un simulacro de calicatas en los puntos del problema del deterioro, con este material extraído de la vía se ha realizado los estudios y pruebas en el laboratorio de suelos, teniendo resultados que el valor relativo de soporte CBR varía entre 32% - 28%. Aprovechando la existencia de una cantera que existe lindante a la carretera por lo



se mejorara y se estabilizara la capa de la subbase utilizando como agente estabilizante la cal.

Asimismo, en la actualidad debido al incremento poblacional y la solicitud de la construcción de nuevas vías y el mantenimiento de las mismas, es indispensable para el desarrollo socio - económico, comercial e intercambios culturales entre otros, es necesario la ampliación y mejoramiento de las vías existentes los cuales facilitarían mayor transitabilidad vehicular, aumento de actividad económica e integración comercial, teniendo en cuenta que los encargados de dar soluciones factibles es el estado a través de sus entidades y en coordinación con sus gobiernos regionales y locales.

La utilización de materias primas del medio local, es una de las alternativas para dar soluciones a la estabilidad de un suelo ya sea física, química o electroquímica, dentro de los mismos tenemos la cal, la sal, yeso entre otros, los mismos que mejoran sus propiedades y características físicas y mecánicas de los suelos existen investigaciones con estos componentes, sin embargo, el presente estudio sea realizado con la materia prima cal propio de esta ciudad.

Por otro lado, el mejoramiento y estabilización química con cal es una alternativa económica, factible y técnicamente viable, evidenciado en las investigaciones realizados en diferentes obras viales en diferentes zonas, en donde alcanzaron las mejoras de las características y propiedades mecánicas del material, con el cual amplían su durabilidad y transitabilidad de la vía a la vez evitan explotar nuevas canteras, asimismo para el proceso constructivo existen diversos equipos y maquinarias los cuales aligeran el mezclado entre el aditivo y la cantera, teniendo en cuenta que para este proceso se efectuará la compactación de forma estático o dinámica permitiendo que el suelo aumente su resistencia y durabilidad.



1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Pregunta General

- ¿Cuál será la proporción óptima de cal al mezclar el suelo natural de la cantera de Alto Puno con la cal, para la estabilización química de suelo con cal para el mejoramiento de la sub base en el tramo Km 08+000 al 10+000 de la carretera Puno – Mañazo?

Preguntas Específicas

- ¿De qué manera actúa la Cal agregando diferentes proporciones a la muestra de suelo de la cantera de estudio respecto a su plasticidad, con el fin estabilizar y mejorar el suelo para la capa sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo?
- ¿Cuál será el valor relativo de soporte (CBR), agregando diferentes proporciones de Cal a la muestra de suelo de la cantera Alto Puno, para la estabilización química del suelo con cal para la capa sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo?
- ¿Cuáles será la máxima densidad seca de compactación, al agregar diferentes proporciones de cal a la muestra de suelo natural de la cantera Alto Puno, para la estabilización química del suelo con cal para la capa sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo?

1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Hipótesis General

- Al mezclar el suelo natural (cantera de Alto Puno) y el aditivo cal en su óptima proporción, incrementa las propiedades mecánicas del suelo, para la estabilización



química del suelo con cal para la capa sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo.

Hipótesis Especifico

- Existe la posibilidad, que la cal cause la disminución del índice de plasticidad del suelo de la cantera de Alto Puno al agregar diferentes proporciones de cal, para estabilizar y mejorar el suelo para la capa sub base de la Carretera Puno - Mañazo.
- La cal incrementa el valor relativo de soporte (CBR), al mezclar el suelo natural (cantera de Alto Puno) y la cal agregado en distintas proporciones, para estabilizar y mejorar el suelo para la capa sub base de la Carretera Puno - Mañazo.
- La cal incrementa la máxima densidad seca del suelo natural (cantera Alto Puno) al ser mezclado con las distintas proporciones de cal, para mejorar y estabilizar el suelo para la capa sub base de la Carretera Puno - Mañazo.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El proyecto tiene la finalidad de coadyuvar y aportar con una alternativa de investigación científica aplicable para una forma de estabilizar el suelo con el aditivo cal, para su empleo en mejorar y estabilizar los suelos, a fin de componer la estructura de la capa subbase para la vía en estudio.

El empleo del insumo cal en suelos es propicio para la mejoramiento y estabilización de los suelos, a fin optimizar sus características físicas y mecánicas, asimismo en nuestra región de Puno existe limitadas investigaciones en cuanto a la estabilización química con cal para carreteras a nivel de subbase, por lo que, se utilizara la cal de esta región primordialmente con fines de investigación, el cual será tratado en su forma artesanal inicialmente como piedra caliza natural luego de trasmitirle calor se sufre una reacción química y como resultado obtenemos la cal viva u oxido de calcio y al



agregar agua ocurre un proceso de hidratación con la cual es el tipo de cal a emplear su nombre es cal apagada o hidróxido de calcio con una pureza de 89%. Asimismo, su uso para esta investigación es netamente su accesibilidad y su valor económico, a diferencia de los otros tipos de cal como: la cal grasa, cal magra, cal de magnesia o cal dolomita (combinación de carbono y magnesio), son cales también para diferentes tipos de construcción caracterizándose por su porcentaje de pureza de cal, en cuanto a su valor económico y su accesibilidad es en promedio más costoso, existen diferentes empresas que actualmente vienen proporcionando este insumo principalmente para la estabilización, mejoramiento y mantenimiento de carreteras.

El proyecto se realizará el tratado de la estabilización química con cal para conformar la capa de subbase para la carretera asfaltada de la vía Puno – Mañazo en los tramos establecidos, se debe mencionar que la presente vía actualmente se ha convertido en una alternativa para los vehículos pesados que transitan hacia la ciudad de Arequipa, por lo que dicha vía con el transcurrir del tiempo viene siendo dañada en la estructura de la vía, por lo que con la investigación se plantea una de las soluciones en el tramo de estudio.

Las obras viales construidas con adecuados materiales, insumos y el correcto proceso constructivo, permite la durabilidad de la vía, asimismo es importante el mantenimiento de la vía para el beneficio de los ciudadanos para su desarrollo social, económico y el crecimiento en el ámbito económico de sus caseríos, comunidades, centro poblados y distritos, dando mayor fluidez de tránsito vehicular y acortando tiempos en la movilización de sus pobladores para sus que a aceres cotidianos.



1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

- Determinar la óptima proporción y porcentaje adecuado de cal, para la estabilización química de suelo para el mejoramiento de la capa sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo.

Objetivos Específicos

- Calcular el índice de plasticidad al adicionar diferentes proporciones de cal, para la estabilización y mejora del suelo de la cantera Alto Puno, a nivel de subbase para el del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo.
- Determinar el valor relativo de soporte (CBR), agregando diferentes proporciones de Cal a la muestra de suelo de la cantera Alto Puno, para la estabilización química del suelo con cal para la capa sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo.
- Determinar la máxima densidad seca, al agregar diferentes proporciones de cal a la muestra de suelo natural de la cantera Alto Puno, para la estabilización química del suelo con cal para la capa sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Antecedentes

Según Huevo Maldonado & Orellana Martínez (2009), Indica en su Guía Básica Para Estabilización De Suelos Con Cal En Caminos De Baja Intensidad Vehicular En la ciudad de El Salvador. El estudio realizado sobre la estabilidad de suelos con cal, se fundamentó en la realización de una sucesión de estudios, pruebas y análisis de mecánica de suelos, teniendo presente a las normativas del ASTM y AASHTO, asimismo refirió que el complemento de cal a los suelos reduce la plasticidad, reduciendo su cohesión y su resistencia inicialmente al momento de su ejecución y sanado (curado). Por otro lado, la proporción de cal a emplear, obedecerá de las características y propiedades que presente cada material en específico, realizado la investigación ha concluido que un 4% de cal proporción óptima para este material.

Por otro lado, Cuadros et. al (2017), refiere en su investigación realizada sobre la estabilidad de suelos con la añadidura de cal, para una carretera afirmada, ha obtenido resultados efectivos en cuanto al progreso de sus características físicas y mecánicas de los suelos, definiendo que la estabilidad química con Cal, interviene efectivamente en las propiedades y características del material utilizado para la capa subrasante, alcanzando una proporción del 3% de cal en peso del suelo, disminuyo el índice de plasticidad y aumento favorablemente el valor de CBR.

De la misma forma Badilla & Elizondo (2010), refiere en su investigación el mejoramiento y estabilidad de la subrasante con cal, indicando que los suelos de subrasante presentan altos índices de plasticidad, estas están relacionadas a la gran



susceptibilidad a la humedad, baja capacidad mecánica y la deformación plástica debido a las cargas. El insumo cal como agente estabilizante es utilizada en varios países dando deducciones de gran éxito, logrando acrecentar la durabilidad de las diferentes redes viales y disminuyendo la frecuencia de mantenimiento.

Según Márquez (2001), su proyecto titulado estabilización de suelo con cal en la construcción de carreteras, el cual describe el procedimiento constructivo de la estabilidad de suelos para el mejoramiento de materiales de bancos (cantera) que no cumplen especificaciones técnicas, para lo cual empleo y aprovecho productos reciclados de pavimentos dañados y adicionándolos cal, asimismo recomienda realizar estudios previos que deben realizarse como procedimientos de laboratorio a fin determinar la cantidad optima de cal.

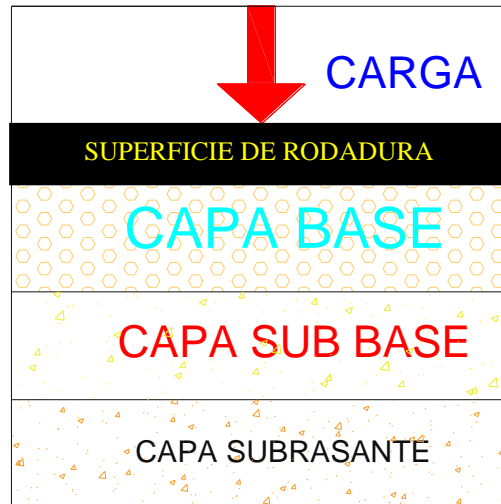
2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Estructura De Un Pavimento

El pavimento es conformado por un ligado de mantos sobrepuestas una sobre otras, que se bosquejan y se construyen haciendo uso de la tecnología, con materias primas, adecuados y compactos. Generalmente están divididos en dos grupos rígidos y flexibles, los cuales se deforman o fallan de manera diferente al asentarles un peso o carga. (Esparza, 2009).

Figura 1

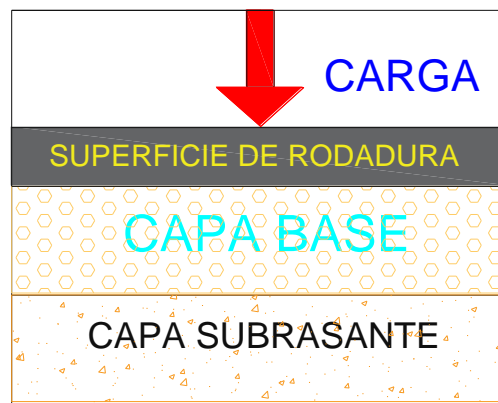
Estructura de un pavimento flexible.



Nota: Adoptada de la revista (Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos)

Figura 2

Estructura de un pavimento rígido.



Nota: Adoptada de la revista (Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos)

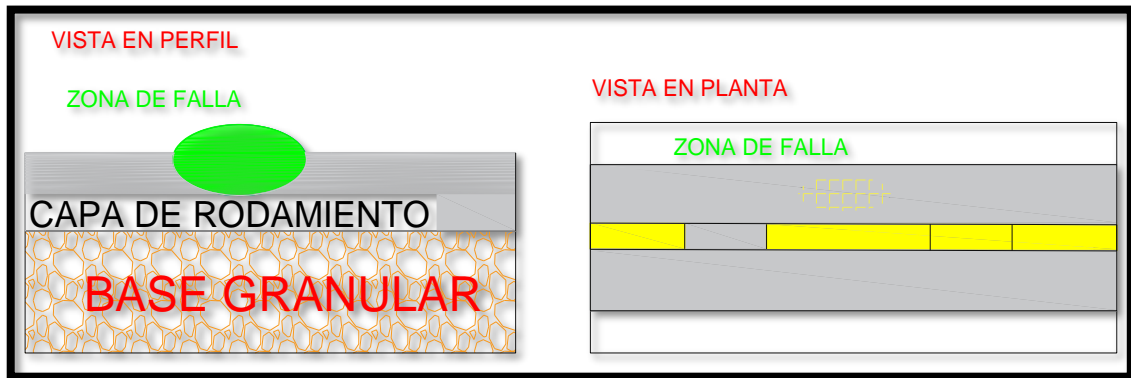
2.2.2 Fallas de pavimentos

1. **Pavimentos Flexibles:** Las características de fallas que se presentan en pavimentos flexibles son:
 - **Fallas o agrietamientos superficiales:** Son de tipo de piel de cocodrilo, usualmente se presentan en las zonas de repetición de cargas, el agrietamiento

suele iniciar en el manto inferior de las capas asfálticas. Este tipo de fallas admite la intrusión de humedad en la base del pavimento, por lo que la falla avanza aceleradamente.

Figura 3

Falla o agrietamiento superficial.

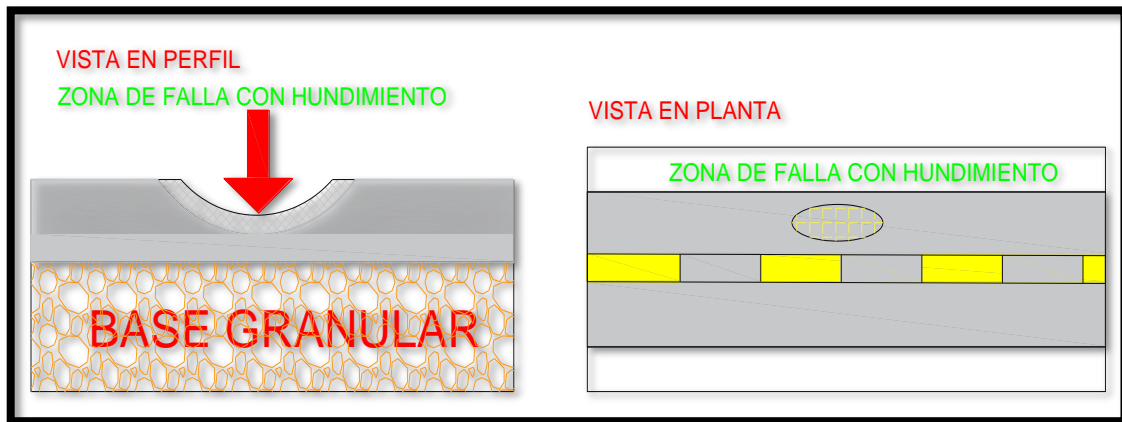


Nota: Adoptada de la revista (Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos).

- **Fallas o agrietamientos profundos.** – Son de tipo de piel de cocodrilo, agrupados fragmentos sueltos y hundimientos, por deformaciones afectando a las componentes de la estructura del pavimento generalmente esta falla es tipo bacheo profundo.

Figura 4

Falla o agrietamientos profundos



Nota: Adoptada de la revista (Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos).

Este tipo de falla se debe a deformaciones por sobre carga o compresibilidad del terreno de fundación cuando no existe una subbase granular o la presencia de materiales compresibles. (Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos).

- **Por agrietamiento profundo desplazamiento lateral.** – Esta falla se presenta por hundimiento y desplazamientos laterales del pavimento, por el exceso de plasticidad en una de las componentes del pavimento (base, subbase, o subrasante), la disposición de plasticidad y humedad en cualquiera de los estratos es determinante para este tipo de fallas.

Figura 5

Por agrietamiento profundo desplazamiento lateral.

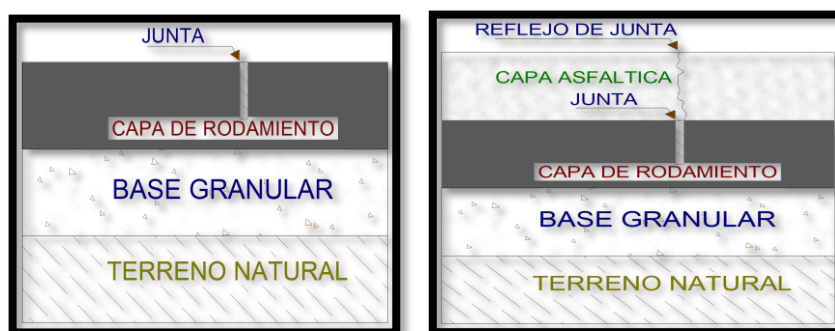


Nota: Adoptada de la revista (Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos)

- **Agrietamiento por repavimentación o reflejos.** – Esta clase de falla se presenta cuando se coloca encima del pavimento rígido una capa de asfalto, generalmente el pavimento rígido existe una grieta el cual se refleja en la capa superior o en la superficie.

Figura 6

Agrietamiento por repavimentación o reflejos



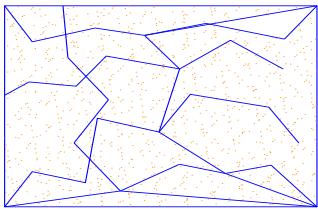
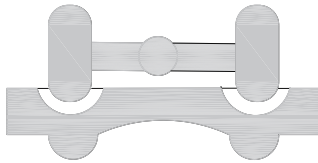
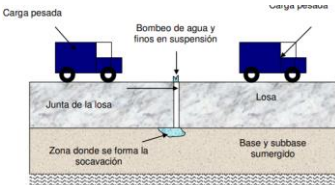
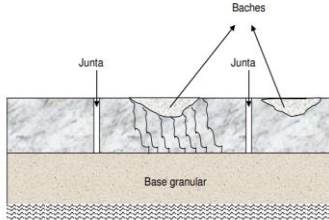
Nota. Adoptada de la revista (Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos).

2. **Falla a nivel de subbase.** – causas que dan origen a las fallas a nivel de subbase en pavimentos flexibles son:

- Deficiente calidad del material empleado.

- Falta compactación.
- Menor de espesor.
- Contaminación del material con otros suelos.
- Fallas al momento de la ejecución de los trabajos o de acabados.

Tabla 1 Fallas en pavimentos flexibles

FALLAS	IMAGEN	DESCRIPCIÓN	CAUSA DE LA FALLA
Grietas de piel de cocodrilo, hundimiento y desplazamientos laterales		Son grietas interconectada, que forman una serie de bloques en el pavimento.	Deflexión de la carpeta y provocada por la carga excesiva de sobre la base, subbase y/o subrasante.
Ahuellamiento		Se observa una deformación constante en alguna de las capas del pavimento.	Producida por consolidación o movimiento lateral de los material en la subbase o subrasante.
Bombeo		Existe acumulación de agua en la estructura del pavimento.	Base o subbase mal estabilizada.
Baches.		fallas producidas por grietas, deformaciones y bombeo.	Base o subbase mal estabilizada.

Nota. Adaptada de la revista Academia (Clasificación de las fallas de pavimentos flexibles y rígidos).

2.2.3 Definición Y Conceptos Generales

Estabilización: Es el proceso químico o físico, a fin de optimizar las cualidades mecánicas de los suelos.



Mejoramiento de suelos: Es un proceso con el fin extender su resistencia, duración, infiltración de agua, demás aspectos y factores que ayuden a mejorar el suelo.

Estabilización Química: El transcurso de cambio de las condiciones iniciales del suelo, conseguido al adicionar un complemento de agentes estabilizantes ya sean orgánicos, inorgánicos u otras sustancias especiales para el tratamiento de suelos.

Cal: Resultado de la disgregación por calor de las rocas calizas.

Subbase: Capa de conformación de un terraplén o carretera.

Carretera: Uso exclusivo para el transporte vehicular, generalmente cuenta con dos carriles y es de uso público, además permite la conexión de las ciudades.

2.2.4 calidad de agregados

Los agregados para ser usados en las obras viales, deberán verificarse con los requisitos mínimos y especificaciones generales exigidas por las normas vigentes, que avalen una buena performance durante su periodo de uso.

A continuación, se detalla los estudios y ensayos previos a realizarse para la calidad de los agregados.

Tabla 2 *Ensayo de calidad de agregados*

ENSAYOS	Sub base	Base Granular	Afirmado	Asfalto	
				Piedra	Arena
Análisis Granulométrico por Tamizado	X	X	X	X	X
Límites de Consistencia	X	X	X	N°40 y 200	
Abrasión	X	X	X	X	
Proctor Modificado	X	X	X		
CBR	X	X	X		
Durabilidad	X	X			



Nota. Adaptado del manual de (Minaya & Ordoñez, 2001).

2.2.5 Subbase granular

Material granular o pedregosos seleccionados, se construye sobre la subrasante, empleado principalmente para apoyar uniformemente la base de la capa de rodamiento del pavimento flexible o rígido, a fin de resistir las cargas que estas transfieren y reducen las energías y/o esfuerzo provocados y distribuye debidamente al estrato inferior inmediato, también previene el desplazamiento de finos hacia las capas superiores.

2.2.5.1 Funciones de la subbase granular

La función principal de la subbase es defender la base, dificultando que el agua ascienda por capilaridad, así como transportar y distribuir cargas al suelo.

La sub base se construye por una necesidad de costo, ya que nos permite convertir un espesor del estrato de la base a un espesor semejante de la subbase, con ello impedimos que el agua suba e impedir que el pavimento sea consumido por la capa subrasante. (Mendoza & Guadarrama, 2008)

2.2.5.2 Características mecánicas

Requisitos Mínimos Para Sub Bases Granulares

Esta labor se fundamente en la construcción de las capas con materiales granulares, las cuales se obtienen de depósitos naturales o artificiales/procesados, los mismos que deberán ser previamente aprobados, luego son instalados sobre las áreas y superficies preparadas.

Los materiales admitidos son seleccionados de depósitos o fuentes, teniendo en consideración su abastecimiento, colocación, transporte y la compactación del material respectivo, de acuerdo con los lineamientos, dimensiones y pendientes referidas en el Plan de Manejo Ambiental. (MTC-2013, pág. 171)



- (1) O previamente, si por su procedencia existe variación estratigráfica horizontal y vertical que crea variaciones en las características físico- mecánicas de los áridos. En caso de que las metrados del Proyecto no alcancen las frecuencias mínimas establecidas, se necesitará al menos una prueba de cada rasgo y/o característica. (EG 2013)
- (2) Ensayo necesario para capas estructurales en lugares con elevaciones superiores a los 3.000 msnm (EG 2013).

Tabla 3 *Requerimientos granulométricos para Subbase granular*

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A (1)	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm. (2")	100	100	-	-
25 mm. (1")	-	75-95	100	100
9,5 mm (3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100
4,75 mm. (N.º 4)	25-55	30-60	35-65	50-85
2,0 mm. (N.º 10)	15-40	20-45	25-50	40-70
425 um. (N.º 40)	8-20	15-30	15-30	25-45
75 um. (N.º 200)	2-8	5-15	5-15	8-15

Notas: Adaptada del manual de carreteras (especificaciones técnicas generales para la construcción EG 2013).

- (1) La curva de graduación "A" debe usarse en lugares con una altitud de 3000 msnm o más. (EG 2013).

Tabla 4 *Subbase Granular Requerimientos de Ensayos Especiales*

Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	Norma AASHTO	Requerimiento	
				< 3000 msnm	≥ 3000 msnm
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T 96	50 % máx.	50 % máx.
CBR (1)	MTC E 132	D 1883	T 193	40 % min.	40 % min.
Limite Liquido	MTC E 110	D 4318	T 89	25 % máx.	25 % máx.
Índice de Plasticidad	MTC E 111	D 4318	T 90	6 % máx.	4 % máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	D 2419	T 176	25 % min.	35 % min.
Sales Solubles	MTC E 219	-	-	1 % máx.	1 % máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-	D 4791	-	20 % máx.	20 % máx.

Nota: Adaptada del manual de carreteras (especificaciones técnicas generales para la construcción EG 2013).

- (1) Referido al 100% de la Máxima Densidad Seca y una Penetración de Carga de 0.1” (2.5 mm). (EG 2013).
- (2) La relación a emplearse para la determinación es 1/3 (espesor/longitud). (EG 2013).



2.2.6 Descripción de ensayos de suelos para control de calidad de la subbase

2.2.7 Contenido de humedad

Objetivo

Establecer la cantidad de humedad de un espécimen de suelo representado en %, se consigue de la proporción del peso húmedo entre el peso seco.

Referencia

- ASTM D2216-92.
- MTC E110-99.
- NTP 339.127: 1998

Equipos

- Horno eléctrico controlado regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza. Con sensibilidad de 0.01.
- Recipientes o taras metálicas.
- Cucharón metálico.
- Guantes.

Procedimiento

- Registrar el peso de la vasija metálica en el cual se pondrá el espécimen de suelo.
- Pesar el espécimen húmedo con la tara metálica, la cantidad depende del tipo de suelo.

Tabla 5 Cantidad de muestra para el ensayo de contenido de humedad

Tamaño máximo de partícula (100% que pasa)	Tamaño estándar del tamiz	Masa mínimo recomendada de espécimen húmedo por el contenido de agua reportados hasta el +/- 0.1%	Masa mínimo recomendada de espécimen húmedo por el contenido de agua reportados al +/- 0.1%
2mm. o menos	Nro. 10	20gr	20gr. ^A
4.75mm.	Nro. 4	100gr	20gr. ^A
9.5mm.	3/8"	500gr	50gr
19.0mm.	3/4"	2.5Kg.	250gr
37.5mm.	1/2"	10Kg.	1 Kg.
75.0mm.	3"	50Kg.	5 Kg.

^A: Deberá utilizarse no menos que 20 gr. para ser representativo.

Nota. Adaptada del ASTM D-2216-98.

- La tara con la muestra de suelo, deberá ser colocada en el horno eléctrico controlado regulable a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, entre 18 a 24 horas aproximadamente, posteriormente para su registro hacer enfriar la tara y el suelo a temperatura ambiente.
- Registrar la muestra de suelo seco con la tara, teniendo en cuenta que se deberá tener un peso constante antes del registro.

Cálculos

$$W\% = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \right) * 100\%$$

Donde:

W%: Contenido de humedad o agua (%).



W₁: Peso de la tara más muestra húmeda (gr).

W₂: Peso de la tara más muestra seca (gr), secado en el horno.

W₃: Peso de la tara (gr).

2.2.8 Análisis granulométrico por tamizado

Objetivo

Establecer cuantitativamente la distribución de tamaños de las partículas del suelo, a través del ensayo granulométrico por tamizado

Referencias

- AASHTO T 88
- ASTM D 422
- MTC E 107-99
- NTP 339.128:1999

Equipo.

- Serie de tamices codificados con base y tapa.
- Balanza. Con sensibilidad de 0.01.
- Horno eléctrico controlado regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Martillo de goma.
- Recipientes, bandejas, cepillo y brocha.

Procedimiento

- La muestra de suelo seco debe ser cuarteada, tomar una parte y registrar su peso seco total.



- En un recipiente con agua limpia depositar el suelo seco, remover y proceder a lavar por el tamiz N° 200, frecuentando este ejercicio hasta obtener que el agua se note lucida.
- Colocar la muestra de suelos lavada en el horno eléctrico a una temperatura de 110 ± 5 , para su secado en un tiempo de 18 a 24 horas.
- Secado la muestra de suelo se procederá con el cernido, a través de la serie de tamices formados de manera decreciente, sacudiendo enérgicamente de forma rotatorio vertical y horizontal. Seguidamente registrar el peso de la muestra de suelo retenida en los diferentes tamices.

Cálculos.

- Se calcula los porcentajes parciales y acumulados de cada tamiz, con relación al peso inicial de la muestra seca.
- Se determina el porcentaje en peso de la muestra del suelo seco que pasa por cada tamiz, restando el 100 % del porcentaje en peso de la muestra del suelo seco acumulado.
- Registrar los datos en una hoja de cálculo y luego grafica la curva granulométrica, abertura de los tamices versus porcentaje (%) que pasa.

$$\% \text{RETENIDO} = \frac{W_{TAMIZ}}{W_1} * 100\%$$

Donde:

W_{TAMIZ} : Peso retenido en cada tamiz.

W_1 : Peso de la muestra seca (secado en el horno).

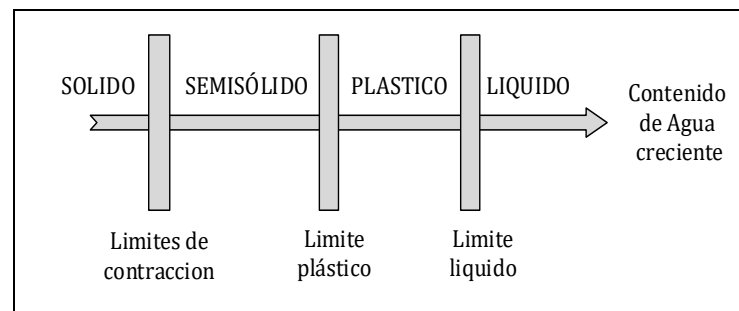
2.2.9 Índices de consistencia

La existencia de minerales arcilla en los suelos de grano fino, el suelo puede ser remodelado siempre y cuando tenga presencia de humedad además no se fracciona, esta acción natural es debido a que el suelo es cohesivo y la presencia de agua adoptada a la que rodea las partículas de arcillas.

La presencia de agua en porcentaje en la frontera de los estados sólido y semisólido está representada al límite de contracción, asimismo en la frontera que divide la fase del semisólido a plástico representa el límite plástico y la fase de plástico a líquido da lugar a al límite líquido, y estos estados se denominan los índices de consistencia o Atterberg.

Figura 7

Límites de Atterberg



Nota. Adecuada del libro de Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (BRAJA M., 2011, pág. 27) .

Límite Líquido

El transcurso que divide la fase de plástico a líquido da lugar al límite líquido (LL), teniendo en consideración la cantidad de humedad representado en porcentaje, por otro lado, los suelos plásticos adquieren en el LL una resistencia mínima al esfuerzo de corte, según Atterberg define un valor de 25 gr/cm² y su cohesión suelo ser cero. (Crespo, 2004, pág. 70).



Ensayo De Limite Liquido.

Objetivo

Determinar el contenido de humedad expresado en porcentaje (%), cuando la muestra se encuentre en la evolución de la fase de plástico al líquido.

Referencias

- AASHTO T89
- ASTM D423
- MTC E110-99
- NTP 339.129:1999

Equipos

- Un recipiente para el combinado de la muestra.
- Una espátula de hoja flexible.
- Aparato de Casagrande con su respectivo ranurador.
- Calibrador.
- Balanza. Con sensibilidad de 0.01.
- Horno eléctrico controlado regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Tamiz N° 40.
- Taras numeradas.
- Agua común o destilada.
- Muestra secada al aire libre pasado por el tamiz N° 40.



Procedimiento

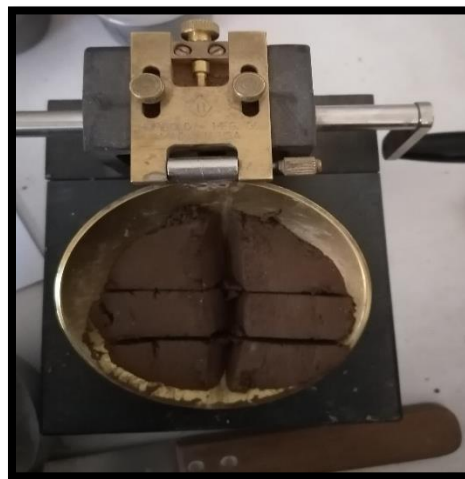
1. Tomar una muestra de 150 gr. a 200 gr. de la parte de la muestra de suelo mezclado que pase el tamiz N° 40.
2. Poner la muestra de suelo en un recipiente adecuado (se sugiere de porcelana), y mezclar con agua entre 15 a 20 ml, agitar, amasar y atajar con una espátula hasta formar un masa uniforme y homogénea. Si fuese el caso aumentar agua en forma gradual a fin de obtener lo deseado.
3. Cuando la mezcla se encuentre en un punto consistente (pegajosa), se coloca una pequeña muestra con ayuda de una cucharilla o espátula a la copa de Casagrande, integrando la mezcla con un grosor de 10 mm. en la porción de máxima de hondura y luego se nivela la superficie.

Nota. Una altura mayor a 10 mm. Disminuirá el valor del límite líquido (L.L.) y una altura menor a 10 mm aumentará el L.L.
4. La muestra colocar en la capsula de Casagrande se fracciona en dos partes iguales/proporcionalmente con ayuda del acanalador/ranurador. “Se traza con el del ranurador desde arriba hacia abajo”. (Crespo Villalaz , 2004, pág. 71)
5. Realizado el corte sobre el suelo de debe observar claramente la separación completa de masa del suelo.
6. Se comienza con la manipulación del equipo de Casagrande a proporción de dos golpes/segundo, se debe contar el N° de golpes necesarios a fin de que el fragmento inferior del corte se junte o cierre a 1.27 cm (1/2”), en caso no ocurriera el hecho descrito entre los 6 a 35 golpes recoger la muestra y realizar nuevamente el ensayo.
7. Una vez obtenido que la ranura se cierra un promedio de media pulgada o (1.27 cm), se anota el N° de golpes, tomar parte de la muestra del suelo de la zona

- contigua a la ranura (generalmente de la zona central) para calcular el contenido humedad.
8. El procedimiento se repite con tres muestras más de suelo a fin de obtener cuatro puntos con diferentes contenidos de humedad y golpes.
 9. “Intervalos sugeridos 25-35 ó 25-30; 20-30 ó 20-25; 15-25 ó 15-20”. (Huaquisto, 2012, pág. 65).

Figura 8

Ensayo de Limite Liquido



Nota. Adaptada del ensayo de limite líquido.

Limite Plástico

Es transición el estado del semisólido al estado plástico, que da lugar al límite plástico, referido a la cantidad de humedad relacionado al peso del suelo seco secado en el horno representado en porcentaje, usualmente el ensayo de limite plástico se efectúa con la mismo muestra de suelo sobrante del ensayo del límite líquido. (Bowles, 1981)

Ensayo De Límite Plástico

Objetivo



Determinar el contenido de humedad indicado en porcentaje cuando el límite se encuentre en la frontera del estado semisólido y el estado plástico.

Referencia

- AASHTO T90.
- ASTM D424.
- MTC E111-99.
- NTP 339.129:1999

Equipo

- Espátula de hoja flexible.
- Recipiente para el material se sugiere de porcelana o similar.
- Balanza con sensibilidad de 0.01gr.
- Horno eléctrico o su similar controlado regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Tamiz N° 40.
- Agua común o destilada.
- Vasijas o taras asignadas con su numeración para el valor de contenido de humedad.
- Vidrio grueso esmerilado para realizar los rollos con el suelo.
- Muestra de suelo (utilizado en el ensayo de L.L.)

Procedimiento

1. Comenzar a moldear la muestra de suelo preparado para el L.L. tomado aproximadamente 20 gr.
2. Se amasa la muestra de manera de obtener bolitas en la palma de la mano para luego enrollar con las yemas de los dedos en una lámina de vidrio y crear rollos.



3. El rollo debe ser deformado a medida que se va realizando la circulación del suelo a medida de obtener un diámetro que sea igual o similar a 3.2 mm. (1/8”).
Nota. “La rapidez normal del doblado/enrollado para la mayor parte de suelos se encuentra entre 80 y 90 pasadas por minuto” (Huaquisto, 2012)
4. El proceso sigue hasta obtener que los rollos empiecen a rajarse y comiencen a desintegrarse en pedacitos.
5. Realizado este proceso y producido el límite plástico, se toman todos los pedacitos de los rollos y se colocan en un recipiente ya tareado a fin de determinar y/o hallar el porcentaje de cantidad de humedad.
6. Luego se repita de nuevo el procedimiento para las dos muestras más de suelo.
7. Para el cómputo del límite plástico se halla la media de las tres muestras de suelos ensayados.

2.2.10 Índice Plástico

El índice plástico o de consistencia, se consigue de la diferencia del límites líquido y plástico, el cual representa la frontera de humedad en la que se encuentra el estado plástico.

Se debe precisar que la proporción del límite líquido y plástico obedece netamente al contenido y clase de arcilla, por lo que índice plástico está sujeto habitualmente a la presencia de arcilla que contiene el suelo.

Calcule de índice plástico

$$IP = LL - LP$$

Donde

I.P. : Índice Plástico



L.L. : Límite Líquido

L.P. : Límite Plástico.

2.2.11 Clasificación de los suelos

Debido a la gran variedad de suelos existentes en nuestro medio ambiente, para la mecánica de suelos se han avanzado diversas metodologías, para sus diferentes necesidades y usos, en nuestra área de aplicación los métodos más usuales y utilizados son la “Clasificación De La Asociación Americana De Funcionarios De Caminos Públicos” (AASHTO) y el “sistema unificado de clasificación de suelos” (S.U.C.S.)

2.2.11.1 Sistema de clasificación AASTHO

Este método fue desarrollado en el año 1929 por el sistema de clasificación de la oficina de caminos públicos (AASHTO), este sistema ha sufrido diversas variaciones, estudios y transformaciones, actualmente se encuentra vigente la que fue publicada en el año 1942 bajo las normas AASHTO M-145 y ASTM D-3282.

La tipificación AASTHO en la actualidad para su uso especifica los suelos en siete grupos del A-1 al A-7, los suelos del grupo A-1; A-2 y A-3 son materiales granulares y los suelos del grupo A-4; A-5; A-6 y A-7 son materiales entre limos y arcillas. (BRAJA M., 2011, pág. 37)

Para la clasificación en el sistema AASHTO debemos considerar los criterios siguientes: (Braja M., 2011)

- **Tamaño Del Grano**

Grava: Material que pasa la malla de 3” (75 mm) y es retenida en la malla No. 10 (2 mm).



Arena: Material que pasa la malla No. 10 (2 mm) y es retenida en la malla No. 200 (0.075 mm).

Limo y Arcilla: Material que pasa la malla No. 200.

NOTA: Se consideran materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por el tamiz N° 200, asimismo se considera material tipo limo y arcilla si los suelos de los que más del 35% pasan por el tamiz N° 200. (Braja M., 2011, pág. 37).

- **Plasticidad**

Limoso: Las partículas de suelos finos poseen un índice de plasticidad de 10 o menor.

Arcilloso: Las partículas de suelos finos poseen un índice de plasticidad de 11 o mayor.

- **Cantos Rodados y Boleos.**

Son materiales mayores a 75 mm (3”) generalmente este material se excluye de la fracción de la muestra de suelo que se está tamizando, por tanto, se considera el % de este material. (Braja M., 2011, pág. 37)

Tabla 6 *Tamaño de grano*

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava (mm)	Arena (mm)	Limo (mm)	Arcilla (mm)
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación Americana De Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas < 0.075)	

Nota. Adaptada del libro de Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (BRAJA M., 2011, pág. 3).



- **Índice de grupo**

Para la valoración de la calidad de un suelo como material disponible para la base, subbase y subrasante de carreteras, se incorpora el índice de grupo el mismo que se pone en paréntesis luego se designa el grupo y subgrupo, está determinado por la formula siguiente:

$$GI = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10) \quad 1.1$$

Donde F = Porcentaje que pasa la malla N° 200

LL = Limite líquido.

P = Índice de plasticidad.

Si la cuantía del índice de grupo es negativa, se toma el valor igual a 0, también se debe considerar que el índice de grupo en caso sea un valor con decimales se debe redondear al valor entero más próximo, para clasificar los suelos siguiendo este sistema los valores del ensayo se administran de izquierda a derecha, además debemos precisar que el índice de grupo siempre va en paréntesis. (BRAJA M., 2011, pág. 37).

Tabla 7 Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras

Clasificación general	materiales granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla No. 200)							materiales granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla No. 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5*	A-7-6**
Porcentaje que pasa las mallas N° 10	50 máx.	30	50									
N° 40	máx.	máx.	51 min	35	35	35	35	36	36	36	36	
N° 200	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	mín.	mín.	mín.	mín.	
Característica de la fracción que pasa la malla No. 40												
Limite liquido				40 máx.	41 máx.	40 máx.	41 máx.	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min	
Índice de Plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min.	
Tipos usuales de materiales componentes significativos	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena Fina	Grava y arena limosa o arcillosa				Suelos Limosos		Suelos arcillosos		
tasa general de subrasantes	De excelente a bueno							De mediano a pobre				

* Para A-7-5,

$PI \leq LL - 30$

** Para A-7-6,

$PI > LL - 30$

Nota. Adaptada del libro fundamentos de ingeniería geotécnicos (BRAJA, 2011, pág. 36)

2.2.11.2 Sistema unificado de clasificación de suelos

El método fue planteado por Casagrande en 1942, con el fin de ese entonces, la construcción de aeropuertos, esta propuesta ha sido diseñada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, se cataloga los suelos en dos grandes categorías:



1. Suelos de granos grueso de tipo grava y arena con menos del 50 % pasando por el tamiz o malla N° 200. Este grupo se identifica con los prefijos G o S, donde G es grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.
2. Suelos de grano fino con 50 % o más pasando el tamiz o malla N° 200. En este grupo existen tres tipos de suelos los cuales se identificarán con los siguientes prefijos M: Limo orgánico, C: Arcilla inorgánica, O: Arcillas y limos orgánicos y el símbolo Pt: se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.
(Braja M., 2011, pág. 39)

Símbolos usados para la clasificación por el sistema SUCS.

W: Bien graduado.

P: Mal graduado.

L: Baja plasticidad (limite liquido menor que 50).

H: Alta Plasticidad (limite liquido mayor que 50).

Para la clasificación por este sistema debemos conocer los parámetros siguientes:

1. El porcentaje de grano grueso (grava), porción pasado el tamiz 76.2 mm y retenida en el tamiz N° 4(4.75mm).
2. La arena representada en (%), porción pasado el tamiz N° 4 (4.75mm) y retenido en la malla N° 200 (0.075 mm). (BRAJA M., 2011, pág. 39)
3. El porcentaje de limo y arcillas, porción pasado por el tamiz N° 200 (0.075 mm).
4. Coeficiente de uniformidad C_u y coeficiente de curvatura C_c .

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

Dónde: C_u : Coeficiente de uniformidad.



C_c : Coeficiente de curvatura.

D_{10} : Diámetro al 10% de finos de la curva granulométrica.

D_{30} : Diámetro al 30% de finos de la curva granulométrica.

D_{60} : Diámetro al 60% de finos de la curva granulométrica.

5. Limite liquido e índice de plasticidad de la fracción de suelo que pasa la malla N° 40. (Braja M., 2011, pág. 41)

Procedimiento de clasificación para suelos gruesos (más de 50% retenido en el tamiz N° 200 (0.075mm)).

Según Braja Das (2011), refiere:

- Si menos del 5 % pasa el tamiz N° 200; C_u mayor 4 y C_c entre 1 y 3 se trata de un suelo GW (grava bien graduado). Si los coeficientes no se encuentran en los términos antes expuestos el suelo es un GP (grava mal graduada).
- Si más 12% pasa el tamiz N° 200; revisar el límite liquido e índice de plasticidad en la carta de plasticidad, si el I.P. es menor que 4 el suelo es un GM (grava limosa), y si el I.P. es mayor que 7 el suelo es un GC (grava arcillosa).
- Si más 12% pasa el tamiz N° 200; los límites Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML. El suelo es un GC-GM (grava limo-arcillosa).
- Si el porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5% y 12%; se debe evaluar los criterios antes expuestos para determinar los siguientes suelos GW-GM; GW-GC; GP-GM y GP-GC correspondientemente.

Procedimiento de clasificación para suelos finos (si el 50% o más pasa el tamiz N° 200 (0.075mm)).

Según Braja Das (2011), refiere:



- CL: Para determinar es tipo de suelo inorgánico, debe cumplir el $LL < 50$ y $IP > 7$, se grafica sobre o encima de la línea A (véase Carta Plasticidad).
- ML: Para determinar es tipo de suelo inorgánico, debe cumplir el $LL < 50$ y $IP > 4$, se grafica sobre o encima de la línea A (véase la Carta Plasticidad).
- OL: Para determinar es tipo de suelo orgánico si $LL < 50$, debe cumplir (LL-secado en horno/LL-sin secar) < 0.75 . (véase la carta de plasticidad).
- OH: Para determinar es tipo de suelo orgánico si $LL \geq 50$, debe cumplir (LL-secado en horno/LL-sin secar) < 0.75 . (véase la carta de plasticidad).
- CH: Suelo inorgánico si $LL \geq 50$; el IP se grafica sobre o arriba de la línea A. (véase la carta de plasticidad)
- MH: Suelo inorgánico si $LL \geq 50$; el IP se grafica debajo de la línea A. (véase la carta de plasticidad)
- CL-ML: Suelo inorgánico, se grafica en la zona sombreada de la carta de plasticidad.
- Pt: Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Figura 9

Carta de plasticidad



Nota. Adaptada del libro de (GONZALES BOADA, 2005)

Tabla 8 Clasificación de suelos por el sistema SUCS.

DIVISIONES PRINCIPALES			Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO	
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5% ->GW,GP,SW,SP. >12% ->GM,GC,SM,SC. 5 al 12% ->casos límite que requieren usar doble símbolo.	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.
	SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plásticidad.		
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.		
OL			Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.			
Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50		MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.			
		CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.			
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.			
Suelos muy orgánicos			PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.		

Nota. Adaptada del autor (Gonzales B., 2005)

2.2.12 Proctor modificado

Objetivo

Establecer la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo a una determinada compactación.



Referencias

- AASTHO T91.
- ASTM D1557-91.
- NTP 339.141: 1999

Generalidades

Se representa la medida del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado mediante un proceso establecido para diferentes niveles de humedad. Este ensayo tiene por objeto: (Crespo, 2004).

- a) Calcular el máximo peso volumétrico $\gamma_s \text{ máx}$ y el contenido la humedad óptima w_o a lo que alcanza un material, cuando se efectúa la compactación.
- b) Calcular el grado de compactación logrado por el espécimen del material, en el transcurso de la construcción de (camino, aeropuertos y calles), con relación al peso volumétrico y peso volumétrico máximo Proctor conseguido en la zona de trabajo (Crespo, 2004, pág. 102).

El ensayo cuenta con un molde de volumen específico de acuerdo a las normas y un peso aproximado de 10 libras, el cual baja en caída libre a partir de una altura de 18", efectuado el ensayo se calcula la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo (%) a una determinada compactación (Crespo, 2004).

El presente ensayo cuenta con tres métodos A, B y C, es función del molde y N° de golpes (25 y 56), por lo que se debe elegir uno de ellos, asimismo se debe cumplir con el siguiente requisito en cuanto a la granulometría de una muestra de suelo, el 30 % en peso sea retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ " (Crespo, 2004, pág. 102).

Método A:

- Si el 25% o menos del material es retenido en el tamiz N° 4.



- Usar el material que pasa el tamiz N° 4.
- Usar el molde de 4" (1/30 pie³), en 5 capas y 25 golpes por capa.

Método B:

- Si el 25% o menos del material es retenido en el tamiz de 3/8" y más del 20% del material retenido en el tamiz N° 4.
- Usar el material que pasa el tamiz de 3/8".
- Usar el molde de 4" (1/30 pie³), 5 capas y 25 golpes por capa.

Método C:

- Si menos del 30% del material es retenido en el tamiz 3/4" y más del 20% es retenido en el tamiz de 3/8".
- Usar el material que pasa el tamiz de 3/4".
- Usar moldes de 6" (1/13.33 pie³), 5 capas y 56 golpes por capa

Equipo

- Mallas o Tamices de las series 2", 3/4", 3/8" y N° 4.
- Mazo de jebe(goma).
- Escobilla(brocha) metálica y cucharón.
- Molde Proctor modificado.
- Pisón de 10 libras de peso.
- Horno eléctrico o su similar controlado regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de 20 kg de capacidad.
- Balanza con sensibilidad de 0.01%.
- Razador o regla metálica.
- Probeta dosificada de 500 cm³.
- Recipiente metálica pequeño y grande.

- Taras metálicas.

Figura 10

Equipo de Ensayo Proctor Modificado.



Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.

Cálculos

Se calcula la densidad seca con formula siguiente:

$$D_s = \frac{D_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

D_s =Densidad seca.

D_h =Densidad húmeda de la muestra de suelo.

W = Contenido de humedad de la muestra de suelo.

Determinación de densidad húmeda

$$D_h = \frac{P_1 - P_2}{V}$$

Donde:

P₁: Peso de la muestra húmeda más molde.

P₂: Peso del molde.

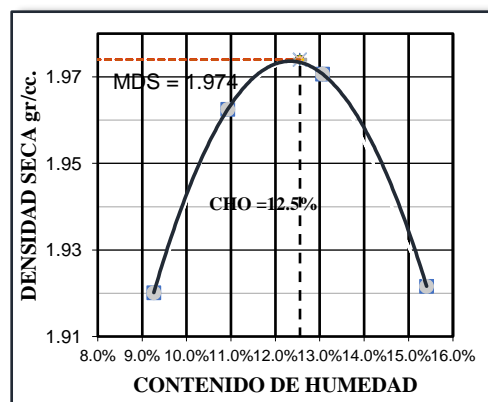
V: Volumen del molde.

Una vez terminado con el enrasado se invierte el molde, retirando el disco espaciador, luego poner un papel filtro en el fondo del molde, en seguida registrar el peso del suelo húmedo y del molde.

Se procede a unir los puntos aproximándose a una curva generalmente en forma de parábola, por lo se traza en el pico de la curva una recta vertical y horizontal en cual se halla la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo.

Figura 11

Densidad Máxima Seca y contenido de humedad óptimo.



Nota. Adoptada del ensayo de Proctor modificado.

2.2.13 Valor relativo de soporte (CBR)

Objetivo

Evaluar la capacidad portante del suelo para las capas de conformación subrasante, subbase y base de un pavimento.



Referencias

- AASHTO T90.
- ASTM D424.
- MTC E111-99.
- NTP 339.145:1999.

Generalidades

El ensayo del valor relativo de soporte (CBR), mismo que es presentado por los ingenieros T. E. Staton y O. J. Porter del Departamento de Carreteras de California de forma empírica, a fin determinar la calidad y resistencia del suelo con las medidas densidad seca y contenido de humedad controlada. El CBR determinado se expresa en (%) donde la carga unitaria del ensayo es directamente proporcional a la carga unitaria de patrón, la penetración ensayada a la muestra de suelo es 0.1” y 0.2” los cuales son los valores que determina el porcentaje de CBR, los valores varían de acuerdo a la compactación, contenido de humedad al momento de compactar. (Huezo Maldonado & Orellana Martinez , 2009, pág. 27).

Debemos tener en cuenta que el presente ensayo se prepara para tres muestras de suelos con desiguales energías de compactación representados por el N° de golpes (12, 25 y 56) por capa.

“La prueba CBR, reside en evaluar la resistencia al punzonamiento de un suelo sobre especímenes preparados mediante el proceso de ensayo Proctor y comparar los resultados obtenidos con un valor de referencia estándar”. (Huezo Maldonado & Orellana Martinez , 2009, pág. 28).

Este ensayo se utiliza para evaluar la calidad de los suelos, en cuanto a su valor portante, este se relaciona con la resistencia a la penetración del suelo compactado, y

sujeto a un proceso de saturación por un tiempo determinado. (Huezo Maldonado & Orellana Martinez , 2009)

El ensayo se divide en dos partes.

- a) Determinar del peso volumétrico máximo (CBR) y la humedad óptima.
- b) Determinación de la resistencia a la penetración después de compactado y sujeto a un periodo de saturación. (Crespo, 2004, pág. 107)

El número CBR se determina como la relación de la unidad de carga en (M/Pa), necesaria para originar una profundidad de penetración especificada del pistón de penetración (cuya área es de 19,35 cm²) dentro de la muestra de suelo compactado con un contenido de humedad y densidad suministrados con respecto a la carga unitaria estándar necesario. (Huaquisto, 2012)

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga unitaria del patron}} * 100\% \quad (1.2)$$

Valores de carga unitaria patrón utilizados en la ecuación (1.2)

Tabla 9 *Valores de carga unitaria*

Penetración (mm)	Carga unitaria patrón (Mpa)	Carga unitaria patrón (kg/cm ²)
2.5	6.9	70.4
5.0	10.3	105.1
7.5	13.0	132.7
10.0	16.0	163.3
12.7	18.0	183.7

Nota: Adatada del libro de mecánica de suelos manual de laboratorio (Huaquisto, 2012, pág. 34).

El valor de CBR usualmente se fundamenta en la correspondencia de carga para una penetración de 2.54 mm (0.1”), además deberá verificarse el valor de 5.08 mm (0.2”),

si su CBR es mayor al de una pulgada deberá tomarse el valor de este CBR de dos pulgadas. (Huaquisto, 2012, pág. 34).

Aplicaciones del CBR

Su empleo es para calcular el soporte y calidad de los suelos a nivel de base, subbase y subrasante, que comprenden solo una mínima cantidad de suelo que pasa el tamiz de 50 mm y se mantiene en el tamiz de 20 mm. Se aconseja que la proporción no supere el 20%. (Contreras & Garcia, 2019, pág. 26).

La siguiente tabla 10 da una clasificación típica:

Tabla 10 *Clasificación de los suelos de acuerdo al valor de CBR*

CBR	CLASIFICACIÓN GENERAL	USOS	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN	
			SUCS	AASHTO
0-3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7 A4, A5, A6,
3-7	Pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A7
7-20	Regular	Subbase	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Bueno	Base-Subbase	GM, GC, GW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW, GM	A1-a, A2-4, A3

Nota. Adaptada del manual de laboratorio de suelos para ingenieros (Bowles, 1981)

Equipos y herramientas

- Series de Tamices de 2", ¾", 3/8" y N° 4.
- Molde de CBR.
- Disco espaciador (metálico).
- Pisón de 10 libras de peso.

- Balanza. Con sensibilidad de precisión al (0.01 gr).
- Balanza grande de sensibilidad (± 1 gr de 20 kg).
- Horno eléctrico o su similar controlado y regulable a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Regla o rizador metálico.
- Probeta dosificada de 500 cm^3 .
- Recipiente metálico grande.
- Cucharon metálico.
- Taras metálicas.
- Equipo de prueba.
- Juego de placas (10 libras).
- Dial para medir la expansión del suelo.
- Papel filtro cortado de diámetro de 6".

Figura 12

Equipos y materiales para el ensayo de CBR.



Nota. Adaptada del ensayo CBR.

2.2.14 Ensayo de Abrasión

El desgaste de los Ángeles es para determinar o estimar el alcance perjudicial que origina a los materiales su grado de alteración, su baja resistencia estructural, planos de debilitamiento, plano de cristalización y formas de sus partículas.



Máquina De Abrasión Los Ángeles

Diseñado para calcular la resistencia a la abrasión de los agregados, el tambor de Los Ángeles está construido de acero en forma cilíndrico, tiene una tapa de acceso de materiales ajustable, gira sobre un eje montado sobre unos caballetes de metal apoyados en el piso, cuenta con medidor de revoluciones, en la base cuenta con una bandeja de descarga y un juego de billas de acero.

Objetivo

Determinar y/o calcular el porcentaje de desgaste del agregado de tamaño menores a 1 ½” (37.5 mm).

Referencia

- ASTM C-131, ASTM C-535.
- AASHTO T-96.
- MTC E207-1999.
- NTP 400.019.

Equipo

- Máquina de desgaste de Los Ángeles.
- Serie de tamices (1 ½”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, ¼”, N° 4, N° 8, y N° 12).
- Billas o esferas de acero de (46.38 mm a 47.63 mm) de diámetro en un peso semejante entre (390 a 445kg).
- Horno eléctrico regulable a 110 ± 5 °C.
- Balanza. Con sensibilidad de precisión de 0.01gr.

Figura 13

Máquina De Abrasión De Los Ángeles.



Nota. Adoptada del ensayo de abrasión de Los Ángeles.

Materiales

La cantidad de muestra a experimentar y la cantidad de billas o esferas a introducir obedecen de la granulometría del material granular(gruoso). Asimismo, se debe precisar que el método a elegir, indica la cantidad de material a emplear, el N° de billas o esferas, el N° de revoluciones, período de vueltas, en la tabla 11 se muestra el método a emplear.

Tabla 11 *Peso de agregado y número de esferas para agregados gruesos hasta de 1 ½”*

MÉTODO	A	B	C	D
DIÁMETRO	CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr.)			
Pasa el tamiz	Retenido en tamiz			
1 1/2”	1”	1250±25		
1”	¾”	1250±25		
¾”	1/2”	1250±10	2500±10	
½”	3/8”	1250±10	2500±10	
3/8”	¼”		2500±10	
¼”	N°4		2500±10	
N°4	N°8			5000±10
PESO TOTAL		5000±25	5000±25	5000±25
N° De Esferas		12	11	8
N° De Revoluciones		500	500	500
Tiempo de rotación (min)		15	15	15

Nota: Especificaciones técnicas generales para construcción de carreteras EG 2013, (MTC-2013).

Procedimiento

- La muestra debe ser lavada y secada en el horno eléctrico a una T° constante 105 ± 5 °C, asimismo la muestra antes debe ser tamizada según los tamices que fueron indicadas y mezclar los agregados según el método que corresponda, según la tabla 12.
- Registrar el peso de la muestra de suelo en la balanza, para los agregados gruesos menores a 1 ½”.
- Colocar la muestra junto con las esferas abrasivas (cargas abrasivas) en la máquina de Los Ángeles, cerrar la ranura del cilindro con su respectiva tapa, la tapa posee una empaquetadura la cual imposibilita la dispersión de polvo y está asegurado por intermedio de pernos, luego prender el equipo regulando el N° de revoluciones especificado según la tabla 12.



- Una vez completado el periodo de rotación, se extrae la muestra y en seguida se tamiza por la malla N° 12.
- La muestra retenida en la malla N° 12 se lava y hace secar en el horno eléctrico, a una T° constante de (105° ± 5 ° C), luego registrar el peso de la muestra.

Cálculos

Realizado el ensayo el valor obtenido se muestra en tanto por ciento de desgaste, determinado como la resta del P. inicial y el P. final con relación al P. inicial.

$$\% \text{Desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} * 100\%$$

Dónde: P_{inicial}: Peso inicial de la muestra seca (antes del ensayo)

P_{final}: Peso final de la muestra seca (después del ensayo) lavado sobre el tamiz N° 12.

2.2.15 Ensayo de penetrómetro dinámico ligero (DPL)

El DPL fue desarrollado en 1956 por Scala; estudios realizados en campo por Livneh y Ishali (1987) y Kleyn (1975) han sido básicos para la evaluación de pavimentos. Posteriormente se ha difundido su uso en Inglaterra, Australia, Canadá, Nueva Zelanda y Estados Unidos. (Viscarra Agreda , 2005, pág. 4)

Este equipo se utiliza básicamente para probar la resistencia de suelos compactados y no perturbados, para calcular un valor de CBR en campo, a diferencia de este último, el DPL brinda características como la simplicidad y la economía de uso. Implícitamente, el DPL calcula la capacidad estructural de las distintas capas que componen un pavimento., Detecta simultáneamente el grado de heterogeneidad que puede encontrarse en una



sección y la uniformidad de compactación del material, de una manera rápida, continua y bastante precisa. (Viscarra Agreda , 2005, pág. 4).

Objetivo

Determinar las condiciones de resistencia del terreno in situ y estimar los parámetros de resistencia del suelo.

Referencia

- NTP 339.159
- DIN 4049

Equipo

- Equipo DPL.
- Pala.
- Pico.
- Cinta Métrica.
- Llave Stillson.
- Guantes.
- Equipos de protección de personal.
- Conos de seguridad.

Figura 14

Equipo Penetrómetro Dinámico Ligero (DPL).



Nota. Equipo del laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la EPIC.

Procedimiento

- Se procede a limpiar y retirar el material orgánico, hasta que la zona de trabajo este libre.
- Luego se comienza a acoplar el equipo DPL y marcar en las barras de acero a razón de 10 cm. para referenciarse.
- Se coloca el equipo DPL de forma vertical a fin de comenzar con el ensayo, para luego comenzar a contar los golpes cada 10 cm.
- El ensayo DPL necesita mínimo dos operarios uno se encarga de mantener la verticalidad y soporte del equipo, el segundo se encarga de coger el martillo y un tercero deberá registrar el número de golpes cada 10 cm., asimismo para alcanzar mayores profundidades se articula varillas de 1 metro sobre el equipo.
- Antes de iniciar el ensayo DPL se debe introducir el cono asentándolo 2” en el fondo a fin de garantizar que se encuentre completamente confinado.

- El procedimiento de golpe con el martillo es levantar hasta la parte superior del eje de recorrido y dejarlo caer en caída libre, no debe tocar la parte superior ni tampoco impulsar el martillo hacia abajo.
- Repetir los pasos descritos en diferentes puntos donde se realizará el ensayo hasta profundidades deseadas.

Cálculos

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes investigaciones para correlacionar el valor DPL con otras características físico mecánicas de los suelos; la selección apropiada de este tipo de correlaciones está relacionada con el juicio del profesional en el área y las especificaciones del equipo DPL. La Tabla 13 resumen las expresiones más trascendentales obtenidas con el uso del DPL. (Viscarra, 2005)

Tabla 12 Resumen de expresiones para correlacionar el número DPL con otros valores

Relación entre DPL (mm/golpe)	Ecuación	Autor/Autores	Observaciones
	$CBR = \frac{292}{DPL^{1.12}}$	Van Vuren (1968), Kleyne (1975), Livneh e Ishai(1987)	Apto para tipo de suelos (granulares y cohesivos)
Valor Relativo de Soporte (CBR) %	$Log(CBR) = 2.317 - 0.858Log(DPL)$	Transport Research Board (1986)	Apto para tipo de suelos
	$CBR = \frac{1}{0.002871 * DPL}$	Webster S.L. et al. (1994)	Para Suelos CH
	$CBR = \frac{1}{(0.017019 * DPL)^2}$	Webster S.L. et al. (1994)	Para suelos CL con CBR < 10%

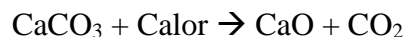
Nota. Adaptada de la revista titulada (El Cono Dinamico de Penetracion y su Aplicacion en la Evaluacion de Suelos, 2005).



2.2.16 La cal

Es para la estabilizar los suelos con el óxido de calcio también nombrada cal viva o anhidra, cuyo material es obtenido por una reacción endotérmica, cuando la piedra caliza es calcinada hasta una temperatura promedio 900°C, por otro lado, las cal también son denominadas aéreas debido a la propiedad que tiende a solidificarse en el aire al mezclarse con agua, por la reacción química del anhídrido carbónico. (Aza Morales, 2009)

Según Aza Morales (2009). Refiere que la cal es el resulta de la desintegración por calor de las rocas calizas, además refiere que las piedras calizas naturales ocasionalmente se encuentra en su forma natural, es decir como carbonato de calcio o carbonato cálcico, estos vienen juntamente con otros materiales, tales como arcillas, hierro, azufre, carbonato de magnesio, álcalis y materia orgánica que no se volatiliza al entrar en calor o al calcinarse, la piedra caliza transfiere a la cal propiedades según la fracción en que participan. Cuando la piedra caliza es sometida a una temperatura entre 880°C y 900°C, se produce la reacción endotérmica siguiente:



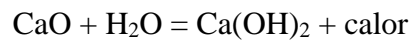
A esta reacción endotérmica se denomina calcinación y se infiere que:

- La piedra caliza disminuye su humedad de cantera entre los 120°C y 150°C.
- Se origina la desintegración de la piedra caliza en oxido de calcio y bióxido de carbono (CO₂).
- El bióxido de carbono, se desintegra en la atmosfera en forma de gas.
- La cal es el resultado utilizable. (Aza Morales, 2009)

La cal o CaO (oxido de calcio), es conocido como cal viva es de color blanco, cuyo P.E. está comprendida en 3.08 y 3.31.



Al agregar agua a la Cal Viva (este proceso de hidratación) es denominado reacción exotérmica:



El resultado de este proceso es Denominado cal apagada o hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$. (Aza Morales, 2009).

2.2.17 Clases de cal

- Cal Grasa. – La piedra caliza en su forma natural contiene menos del 5% de arcilla, menos del 3% de carbonato de magnesio.
- Cal Magra o Cal Anda. – La piedra caliza en su forma natural contiene material adulterante que no produce reacción química en el producto resultante y contiene solo entre 50% y 80% de óxido de calcio.
- Cal Hidráulica. – La piedra caliza en su forma natural, más el 5 % de arcilla, que al ser sometido a una temperatura promedio de 900°C se convierte en cal hidráulica.
- Cal de Magnesia. – La piedra caliza en forma natural contiene carbonato de magnesio y ser sometido a calcinación contiene entre 10% a 25% de óxido de magnesio. (Aza Morales, 2009)

2.2.18 Fabricación y usos de la cal

Fabricación

- **Extracción.** – La actividad de extracción usualmente se realiza a campo abierto con el fin de lograr uniformidad en las partículas obtenidas, esta acción se hace por medio de voladuras.

Figura 15

Cantera de piedra caliza



Nota. Material recogido para calcinación.

- **Calcinación.** – Se realiza al aire libre o en hornos convencionales de forma continuo o discontinua.

Figura 16

Calcinación de la Cal.



Nota. a) Colocación de la piedra caliza, b) tapado de la piedra caliza para su calcinación y c) Proceso de calcinación de la piedra caliza.

Figura 17

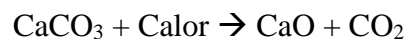
Proceso final de la obtención de la cal.



Nota. a) Recojo de la piedra caliza después de haber sido calcinada y b) Finalmente obtención de la cal.

Usos

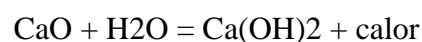
- **Cales vivas.** – Es una cal aérea que está compuesto por oxido de calcio y oxido de magnesio producto de la calcinación de la piedra caliza. (Sampedro Rodriguez, 2005)



“Es comercializada en granos desiguales de acuerdo a diferentes granulometrías, cuando entra en unión con el agua se hidrata teniendo una reacción química bruscamente exotérmica”. (Sampedro Rodriguez, 2005)

- **Cal apagada o Hidratada**

Es una cal aérea que está compuesta primordialmente de hidróxido de calcio. Su reacción química es al hidratar o humedecer controladamente la cal viva.





(...) Su comercialización es en forma de partículas finas o en lechada de cal (mezcla de agua con cal). (Sampedro, 2005)

- **Cal en forma de lechada**

Es la interrupción de cal apagada en agua, su empleo en el proceso de suelos admite, por un lado, evita el polvo que se genera al momento de aplicar la cal y, por otro lado, regular mejor la humedad de los suelos secos. La proporción de cal apagada con agua es (150 gr a 400 gr) de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por litro de agua. (Sampedro, 2005)

La cal es manipulada en forma de lechada para el procesamiento de suelos para conseguir las siguientes ventajas:

- Reducir el polvo al momento de extender la cal.
- Humedecer los suelos secos.

La lechada de cal es prepara en una industria o en el lugar de trabajo, también es preparado en depósitos, cubos o sistemas de agitación. Su aplicación es directa sobre el suelo. (Sampedro, 2005, pág. 25)

Su importancia para el uso vial es para estabilizar los suelos, generalmente para este fin se maneja la cal hidratada en polvo, el cual es envasado en bolsas de papel para su facilidad de transporte. (Sampedro Rodriguez, 2005, pág. 25).

- **La cal como solución**

Para las obras viales, es necesario aprovechar los suelos naturales del lugar de trabajo, sin embargo, se puede presentar algunas dificultades como:

- La aparición de arcillas en el lugar de ejecución.
- El alto contenido de humedad.
- O la combinación de humedad y arcilla.



El valor del contenido de humedad en el lugar de ejecución, implica que si esta elevado, el proceso y trabajo para las maquinarias en obra hace que sea dificultoso, asimismo la compactación resulta ser también complicada, esto debido a que los materiales cuentan con arcillas en su composición donde sus componentes geotécnicos son muy pobres, se debe tener en cuenta de igual forma las condiciones climatológicas. (Sampedro Rodriguez, 2005)

La cal aporta una solución para el tratamiento de suelos a la vez es una opción económica para los problemas de estabilización de suelos.

Según Sampedro Rodriguez (2005) define lo siguiente:

- La suma de cal seca a los suelos demasiado húmedos.
- Permite el uso de los suelos de la traza disminuyendo o eliminando el efecto ambiental debido a la extracción de otros suelos o la disposición excavaciones de la traza.
- En sus diversas formas (viva, hidratada o en lechada), mejora y estabiliza las características de los suelos arcillosos a corto y largo plazo.

2.2.19 Características físicas de la cal.

Finura. - Esta es una característica esencial en la disposición en que intercede en las circunstancias de transporte, acopio y mezcla con el suelo. La hidratación de la cal viva con agua genera cal hidratada, lo que también conduce a una auto pulverización extremadamente fina, incluso micronizada, del producto. Además, la finura puede alterar la reactividad de la cal. (Ancade, Anter, & Ieca, 2010, pág. 15)

2.2.20 Propiedades físicas de la cal.

Según las Especificaciones Generales MTC (2013) define lo siguiente:



Color. - La cal comercial tiene un tono blanco o gris suave, ocasionalmente un color rojizo debido al óxido de hierro que se encuentra en el depósito.

Densidad. - Este atributo se basa de la temperatura de calcinación; cuanto mayor sea la temperatura de calcinación, mayor será la densidad de la cal viva.

Dureza. - La cal varía entre muy blandas y una dureza que se aproxima a la de la piedra original de donde se obtuvo, la dureza de la cal viva dependerá de la temperatura de calcinación.

Porosidad. - Sobre el origen de la piedra caliza y las circunstancias en las que se produce la calcinación. La porosidad en la cal viva es crucial afecta e influye en la actividad química de la sustancia.

Plasticidad. - Es una cualidad física esencial, que se describe como la capacidad de una masa de cal para cambiar su forma cuando se expone a la presión sin romperse y conservar la nueva forma.

2.2.21 Características químicas de la cal.

Según Huevo Maldonado & Orellana Martinez (2009) define lo siguiente:

Contenido de óxido de calcio (CAO). - Es el componente esencial de la cal. Puede estar en forma de óxido en cal viva, en forma de hidróxido $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en cal hidratada.

El contenido en óxido de magnesio (MgO). - Es igualmente fascinante, porque el óxido de magnesio (MgO) normalmente tiene una actividad comparable a la del óxido de calcio. En forma de óxido de magnesio (MgO), o También puede ser en forma hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).



Reactividad de la cal viva. - Indica el ritmo o cinético de la reacción del proceso de hidratación. Es función de las características físicas y químicas del producto y depende de la porosidad de la cal, del grado de calcinación, de la materia prima (caliza) utilizada y de la finura de la cal en el momento del ensayo.

La prueba se basa en el carácter exotérmico de la interacción entre CaO y H₂O, otros elementos que incluyen son los carbonatos de calcio y magnesio, que se miden mediante la concentración de CO₂ de la cal.

2.2.22 Propiedades químicas de la cal.

Impureza. – “La composición química y las cualidades de la cal dependen del tipo y la cantidad de impurezas de la piedra original”. (Huezo Maldonado & Orellana Martinez , 2009)

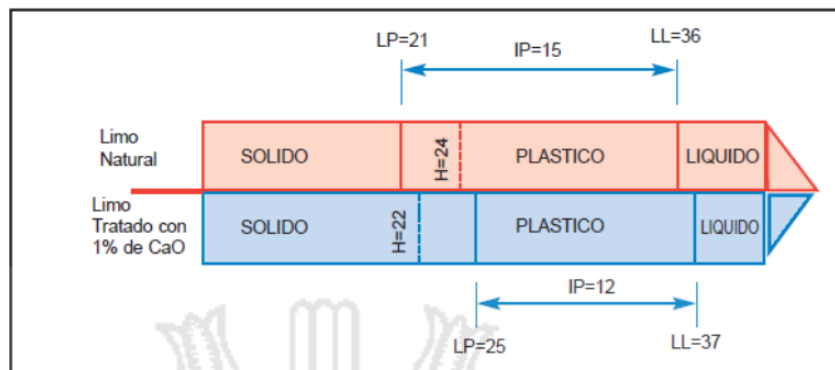
Reacción de la cal con agua. -Este proceso se conoce como hidratación o apagado de la cal utilizando agua necesaria para la hidratación, se obtiene la cal hidratada con la cantidad apropiada de agua indispensable para la hidratación, y se produce cal hidratada. (Huezo Maldonado & Orellana Martinez , 2009)

Actuación de la cal sobre suelos arcillosos. - Para suelos arcillosos los efectos de la cal se pueden presentar de las siguientes maneras:

- Debido a respuestas rápidas (minutos/horas); es una estabilización por alteración.
- debido a respuestas a largo plazo (semanas/meses); es una estabilización por cementación. (Huezo Maldonado & Orellana Martinez , 2009, págs. 32-33).

Figura 18

Efectos de la cal sobre suelos arcillosos



Nota: Adaptada de la guía básica de estabilización con cal (Sampedro Rodriguez, 2005)

Desarrollados las propiedades y efectos químicos de la cal, este elemento químico produce notablemente la rigidez y resistencia del suelo a la vez este pierde plasticidad y ductilidad. La porosidad del suelo seguidamente detrás del tratamiento se podría considerar como un suelo maleable ya que se va cementando gradualmente con el transcurrir del tiempo. (Sampedro, 2005)

2.2.23 Materiales usados para la estabilización de suelos con cal

Suelo. - El suelo que se emplea para la mezcla suelo – cal, debe ser del lugar de operación o material de préstamo seleccionado, además debe cumplir con las especificaciones técnicas del ASTM y AASTHO, asimismo esta mezcla servirá como parte de la estructura del pavimento. El material a usarse para la mezcla suelo-cal, no deberá tener más de 1 % de su peso de material orgánico, y la porción del suelo que pasa el tamiz No 40 su índice de plasticidad debe ser no menor de 10. (MTC, Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos Sección Suelos y Pavimentos, 2014)

Cal.- Se utilizará para la estabilización de suelos es la cal hidratada o viva, y tiene que satisfacer las exigencias y detalles del AASTHO M-216 o ASTM C-977.



Agua. - Debe ser puro y desprovisto de álcalis y otros productos químicos tóxicos. Su pH, medido según la norma NTP 339.073, debe estar entre 5,5 y 8,0 y el contenido de sulfatos, representado como $SO_4=$ y calculado según la norma NTP 339.074, no debe exceder de 3.000 ppm, determinado según la norma NTP 339. 072. En general, el agua potable se considera suficiente y puede utilizarse sin las pruebas de calificación indicadas anteriormente. (MTC-2013, pág. 125)

Mezcla. - Las pruebas y/o ensayos a fin establecer el % de cal y demás exigencias de la mezcla de la cal con el suelo, tienen que ser realizados con los materiales que se van a emplear, e inclusive con el agua a mezclarse, según la norma ASTM D 6276; asimismo la “la porción o porcentaje de la cal está en el rango de 2 y 8 % en peso de los materiales”. (MTC-2013, pág. 126).

Si la mezcla de cal con el suelo, se emplea para las obras viales las componentes estructurales de la carretera o camino, el valor CBR debe cumplir con lo estipulado en las normas y especificaciones vigentes. Para la realización de este método se deberá indicar el método de trabajo, donde se debe especificarse las cantidades de material, volumen de agua, tipo de cal a emplearse o utilizarse y el procedimiento a seguir para lograr las exigencias estructurales solicitados. (MTC & EG, Manual De Carreteras Generales Para La Construcción, 2013)

2.2.24 Propiedades de los suelos estabilizados con cal

Según Manual De Carrteras Especificaciones Tecnicas Generales Para La Construcion (2013) define lo siguiente:

a) Granulometría (agregados)

La granulometría del material a estabilizar puede corresponder a los siguientes grupos de tipos de suelos A-1, A-2, A-3 A-4, A-5, A-6 y A-7. Asimismo, el



tamaño máximo no podrá ser mayor de 5 cm (2"). o 1/3 del espesor de la capa compactada.

- b) **Plasticidad.** - La porción inferior del tamiz de 425 Um (No. 40) debe tener un límite líquido menor a 40 y un índice plástico entre 10 y 50%, medido de acuerdo a las normas de prueba MTC E 110 y MTC E 111.
- c) **Composición Química.** - La razón de sulfatos del suelo, representado como $SO_4=$ no tiene que sobrepasar 0,2% en peso.
- d) **Abrasión.** - Si los materiales (agregados gruesos) a estabilizar, deben tener un desgaste a la abrasión (Máquina de Los Ángeles) MTC E 207 no mayor a 50%.
los cuáles serán los que conformarán las capas estructurales
- e) **Solidez.** - Si los materiales a estabilizar van a conformar capas estructurales y el material se encuentra a una altitud ≥ 3.000 m.s.n.m, los agregados gruesos no deben presentar pérdidas en sulfato de magnesio superiores al 18% y en materiales finos superiores al 15%. (MTC & EG, Manual de carreteras generales para la construcción, 2013).

2.2.25 Mejoramiento de suelos

El mejorar los suelos es el procedimiento de realizar ciertos tratamientos, a fin de mejorar las propiedades físicas o mecánicas del suelo y conseguir un suelo fijo, compacto, estable, apto para soportar las cargas de los vehículos. (Badilla & Elizondo, 2010)

El mejoramiento se puede lograr por varios tratamiento y procedimientos los cuales se describen a continuación.

2.2.26 Sustitución de material

Consiste en sustituir el material cuando nos encontramos con suelos altamente comprensibles, se elimina en su totalidad observando el espesor de la capa menor a un metro, por lo que se sustituye el material con otro de mejor calidad, en caso que los



estratos de suelo su nivel freático este por encima o permanecen saturados es preferible optar un mejoramiento por enrocado según el tipo de trabajo que se va realizar en la construcción del terraplén. (Badilla & Elizondo, 2010)

2.2.27 Mezclas de suelos

Este tipo de mejoramiento es bastante usual generalmente la mezcla se realiza con agregado grueso y fino (grava y arena), los cuales presentan una fricción interna alta, lo que admite soportar grandes cargas o esfuerzos, sin embargo, es poco recomendable para el uso de la conformación de la capa base de una carretera, teniendo en cuenta que los agregados carecen de cohesión y sus componentes se mueven libremente y al tener una carga estas se separan con facilidad.

Los suelos arcillosos tienen cohesión y escasa fricción, los cuales tienden a no estabilizarse por la presencia de agua, al efectuar la mezcla de suelos grava-arena con las arcillas esta mezcla genera un suelo compacto y estable aprovechando sus características mecánicas-físicas de cada uno (fricción y cohesión), la sola mezcla no es suficiente se debe realizar la compactación de los suelos. (Badilla & Elizondo, 2010)

2.2.28 Mezclas con cal

La cal reduce la plasticidad de los suelos arcillosos y es regularmente conveniente, el porcentaje de cal para su uso oscila entre 2% a 6% con respecto al peso del suelo seco. Los antecedentes de proyecto de investigación recomiendan no usar mayor proporción de cal a los indicados, debido a que el suelo va disminuyendo su plasticidad y aumenta levemente su resistencia, la dosificación es acuerdo al tipo de suelo a emplearse. (Badilla & Elizondo, 2010)



Para mejorar y estabilizar los suelos con cal se deberán realizar los ensayos siguientes: índices de consistencia, Proctor modificado, CBR y la prueba de Abrasión. (Badilla & Elizondo, 2010)

La combinación de estos materiales se puede realizar en campo o en planta, teniendo mejores resultados las mezclas en planta dado que las proporciones son más factibles de pesar, la cal se puede añadir en forma de líquida (lechada) o a granel los cuales generalmente son embolsado en sacos de 30 kilos. (Badilla & Elizondo, 2010)

Mezclas con cemento portland. - El mejoramiento con cemento portland es recomendable para suelos granulares (gravas y arenas), el suelo al combinarse con el cemento incrementa sus propiedades mecánicas resistencia y durabilidad, obteniendo la reducción de la proporción de vacíos y la plasticidad del suelo. La proporción utilizada de cemento oscila entre 3% y 8% por el volumen de mezcla. (Badilla & Elizondo, 2010)

Mezclas con productos asfálticos. - Las mezclas con productos y emulsiones asfálticas usualmente usada en los proyectos viales para el mejoramiento y estabilización de suelos, empleándose como pétreos húmedos y no requieren altas temperaturas para realizar los trabajos.

La variedad de emulsiones asfálticas son diversos fraguado lento, medio y rápido, la conformación de la capa a mejorar debe estar en su totalidad culminada, la ejecución de la estabilización con este material debe ser a temperatura menores a 5° C o en lluvia, sin la presencia de vientos, la dosificación y proporción obedecerá a la granulometría de los suelos. (Doroteo, 2014)

2.2.29 Estabilización de suelos

Según el MTC, Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos Sección Suelos y Pavimentos (2014) proporciono lo siguiente:



Es el mejorar las propiedades físicas de un suelo siguiendo un proceso mecánico y agregación de sustancias químicas, sintéticos y originarios. Las estabilizaciones de suelos, es usual efectuarse a la sub rasante inadecuado o escaso, los agentes estabilizantes más conocidos son: cemento, cal, asfalto, sal y otros productos.

A fin de estabilizar una base o sub base granular, generalmente se usa cemento, cal, asfalto y otros agentes estabilizantes que cumplan con los requisitos estándares, cualquier material usado para estabilizar los suelos deben seguir un proceso de compactación.

2.2.30 Suelos estabilizados con cal

Según el MTC, Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos Sección Suelos y Pavimentos (2014) proporciono lo siguiente:

La estabilización con cal, es la mezcla (suelo, cal y agua), la cal utilizada es el óxido de calcio (cal anhidra o viva), esta cal también es denominada cal aérea por sus propiedades que tienden a endurecer en el aire, al ser mezclada con agua, esto por la acción del CO_2 .

Como la mayoría de los suelos contienen sílice y silicatos de aluminio, la inserción de cal anhidra (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)_2) y agua en cantidad adecuada puede lograr la composición necesaria.

Cuando el suelo se combina con la cal, se inicia una rápida reacción de floculación e intercambio iónico, seguida de una reacción puzolánica muy gradual, con la creación de nuevos compuestos. El dióxido de silicio y el óxido de aluminio en los especímenes del suelo reaccionan con el óxido de calcio en presencia de agua para generar silicatos y aluminatos de calcio insolubles.



También aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite la densificación de suelos de elevada humedad natural, que de otro modo no permitirían la construcción de la capa de rodadura sobre ellos.

Los suelos más adecuados para estabilizar con cal son suelos de grano fino y con cierta flexibilidad o plasticidad.

La National Lime Association resume las propiedades que se obtienen después de una estabilización o mejoramiento con cal, en lo siguiente:

Según el MTC, Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos Sección Suelos y Pavimentos (2014) proporciono lo siguiente:

- Disminución del índice de plasticidad, generado por una disminución del límite líquido y a un aumento del límite plástico.
- Disminución notable del ligante natural del suelo por afluencia de partículas.
- Obtención de un material más trabajable y fiable como producto de la reducción del contenido de agua en los suelos.
- La cal ayuda a secar los suelos húmedos lo que acelera su compactación.
- Reducción importante del potencial de contracción y del potencial de hinchamiento.
- Incremento de la resistencia a la compresión simple de la mezcla posterior al tiempo de curado alcanzando en algunos casos hasta un 40% de incremento.
- Incremento del valor relativo de soporte (CBR).
- Incremento de la resistencia a la tracción del suelo



- Alineación de defensas impermeables que impiden la penetración de aguas de lluvia o el ascenso capilar de aguas subterráneas.
- La experiencia americana ha demostrado que una estabilización con cal tiene excelentes resultados, en los siguientes casos:

Según el MTC, Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos Sección Suelos y Pavimentos (2014) proporciono lo siguiente:

- Materiales hechos de combinaciones de grava y arcilla para usar como una capa granular superficial con una inclusión de (2% a 4%) de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en peso.
- Suelos crecidamente arcillosos para usarlos como capa granular superficial (5% a 10% de cal en peso) o como capa inferior (1 a 3% de cal en peso).

CAPITULO III

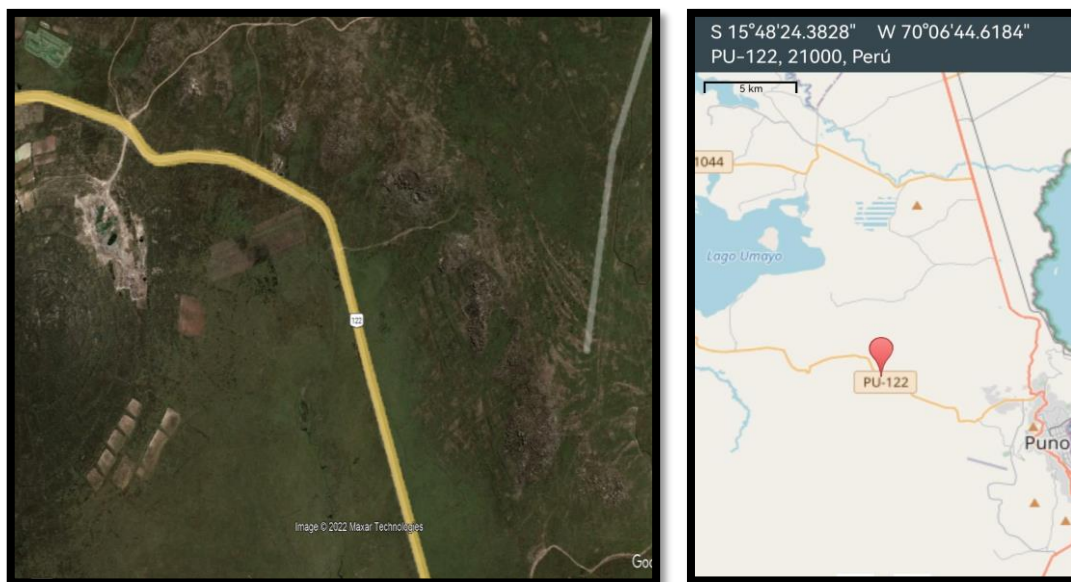
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

La investigación se ha realizado geográficamente y estudio en el distrito de Tiquillaca, Provincia de Puno, Departamento de Puno, específicamente en la vía Puno Mañazo, ubicado en las coordenadas S15°48'24.38" 70°06'44.62", elevación 3.885 msnm, superficie 455.7 Km², tiempo 12 °C, viento del SE a 14km/h y humedad del 55%.

Figura 19

Ubicación Geográfica de Estudio



Nota: Adaptada del aplicativo Google Earth.

3.2 PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO

El estudio realizado del Km. 08+000 al 10+000 de la carretera Puno – Mañazo, a fines del año 2019, y tuvo una duración de un mes y el estudio de la Cantera de Alto Puno, tuvo una duración de ocho meses, asimismo el estudio de la cantera de Salcedo tuvo una duración de un mes y medio.



3.3 PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO.

a) Cal

La normativa del ministerio de transportes y comunicaciones (EG 2013) en su unidad (sección 301B), la cal usada para la construcción de obras viales es la cal viva o hidratada y tiene que cumplir con detalles y exigencias especificadas en la AASTHO M-216 ó ASTM C-977. (Palli, 2015)

Conforme a lo establecido en el párrafo anterior la cal usada el proyecto de investigación cuenta con las características siguientes.

Según Palli (2015) define lo siguiente:

- Producto: Cal viva
- Nombre comercial: Cal artesanal
- Nombre Técnico: Cal Apagada o Hidróxido de Calcio
- Fórmula Química: $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Composición: Hidróxido de Calcio
- Descripción del producto: Polvo blanco fino, de granulometría uniforme.
- Usos: estabilización de suelos
- Características Organolépticas: Olor y sabor característico, cáustico.

Características químicas y físicas:

- Calcio Aprovechable: CaO 89.73%.
- Color grisáceo.
- Consistencia sólido y seco (polvo)

Almacenamiento:

- Almacenar en una seca y alejado de la humedad o agua.

Seguridad:

- Para el manejo de la sustancia usar mascarilla especificado en la norma de seguridad en obra.
- Usar lentes o gas de seguridad para los ojos.

Adicional:

- Soluble en agua, sin reacción.

b) Materiales de cantera

La cantera de estudio y empleada para la presente investigación, se ha localizado cercano al tramo de estudio, además se ha observado que existen diferentes bancos o canteras a lo largo del área de estudio, siendo elegido la cantera que a continuación se denota:

Figura 20

Ubicación de cantera utilizado en la presente investigación.



Nota: Adaptada del aplicativo Google Earth.



Cantera Alto Puno.

- a) **Ubicación:** A diez (10) kilómetros de la ciudad de Puno, ubicado a las faldas del cerro Lumcoporcco.
- b) **Acceso:** El acceso es con normalidad en cualquier época del año, tomando la carretera de la vía Puno – Mañazo, al lado izquierdo cerca de la vía se observa la cantera.
- c) **Situación Legal:** La cantera pertenece actualmente a los comuneros de la comunidad de Chingarani.
- d) **Material de explotación:** Se ha notado el volumen apreciado de explotación, de acuerdo a la geología del terreno observado y a la constante explotación se ha observado la hondura de corte de 2.50, con la extensión de exploración de (125 m x 255 m) y desbroce de 0.20 m, con un factor de esponjamiento de (1.20); por lo que se tiene el resultado siguiente:

Potencia Bruta (P.B.)

$$P.B. = (125m * 255m * 2.50m * 1.20) = 95625.00m^3 = 100\%$$

Potencia Neta (P.N.)

$$P.N. = (95625.00m^3 - (0.20m * 125m * 255m * 1.20)) = 87975.00m^3$$

$$P.N. = \left(\frac{87975.00m^3}{95625.00m^3} * 100\% \right)$$

$$P.N. = 92\%$$

Figura 21

Ubicación de la Cantera Alto Puno.



Nota: Adaptada del aplicativo Google Earth Alto Puno.

La cantera elegida para la presente investigación, es selecta dado que ha sido empleada para diferentes obras viales de la Región de Puno.

Cantera Salcedo

- a) **Ubicación:** A tres 3 km. del centro de la ciudad de Puno, ubicado a las faldas del de la asociación Virgen de Cancharani.
- b) **Acceso:** El acceso es con normalidad en cualquier época del año, tomando la panamericana sur de la carretera de la vía Puno – Desaguadero, en el centro poblado de Salcedo.
- c) **Situación Legal:** La cantera pertenece actualmente al gobierno local de esta Región de Puno.
- d) **Material de explotación:** Se observa el volumen de explotación, de acuerdo a la geología del terreno observado, ya la constante explotación se ha observado la hondura de corte de 1.50, con la extensión de exploración de (120 m x 250 m) y

desbroce de 0.20 m, con un factor de esponjamiento de (1.20); por lo que se tiene el resultado siguiente:

Potencia Bruta (P.B.)

$$P.B. = (120m * 250m * 1.50m * 1.20) = 54000.00m^3 = 100\%$$

Potencia Neta (P.N.)

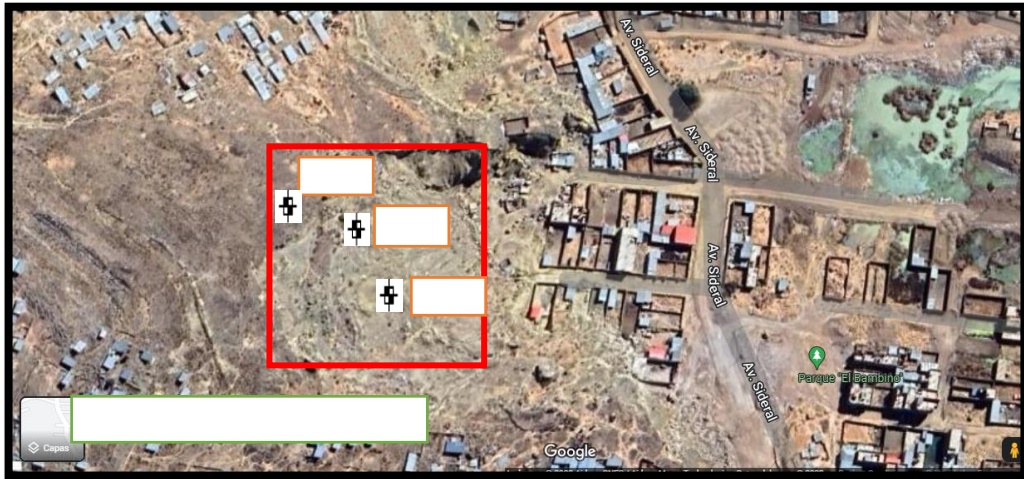
$$P.N. = (54000.00m^3 - (0.20m * 120m * 250m * 1.20)) = 46800.00m^3$$

$$P.N. = \left(\frac{46800.00m^3}{54000.00m^3} * 100\% \right)$$

$$P.N. = 87\%$$

Figura 22

Ubicación de la Cantera de Salcedo



Nota: Adaptada del aplicativo Google Earth Cantera Salcedo



3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1 Población

La población del proyecto está conformada por dos canteras: Salcedo y Alto Puno, las cuales son utilizadas para las carreteras y vías de la jurisdicción del distrito y provincia de Puno.

3.4.2 Muestra

Empleada en la investigación, son los materiales de los suelos de las canteras de Alto Puno, Salcedo y Calitas realizadas en la vía Puno-Mañazo, los cuales presentan mayor potencia en uso para las obras viales. A continuación, se muestra la cantidad de suelo empleado y extraído de las canteras y la vía:

Tabla 13 Cantidad de muestra de suelo la cantera de Alto Puno, Salcedo y Calicata en la vía.

CANTERA N°1 “ALTO PUNO”		CANTERA N°2 “SALCEDO”	Calicatas en la vía Puno - Mañazo
ENSAYO	CANTIDAD (Kg)	CANTIDAD (Kg)	CANTIDAD (Kg)
CONTENIDO DE HUMEDAD	1 kg	1 kg	----
LIMITES DE CONSISTENCIA	2 Kg	2 Kg	----
GRANULOMETRÍA	5 Kg	5 Kg.	----
ENSAYO PROCTOR MODIFICADO	130 Kg	45 Kg	45 Kg
ENSAYO DE CBR	120 Kg	36 Kg	36 Kg
ENSAYO DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES	5 Kg	----	----
TOTAL	263 Kg	89 Kg.	81 Kg.

Nota: Material adoptado para realizar ensayo de mecánica de suelos

3.5 DISEÑO ESTADÍSTICO

3.5.1 Prueba De Hipótesis

Existen dos tipos de análisis estadístico que se realizan para comprobar o probar hipótesis los cuales: los análisis paramétricos y no paramétricos. Cada uno de estos análisis posee sus característica presuposiciones que le sustentan, la elección de cada uno de estos análisis corresponde al investigador y depende de los supuestos que quiera analizar. (Rodriguez E. P., 2009)

3.5.2 Correlación

Correlación es medida estadística que enuncia como dos variables están relacionados linealmente. La medición de la correlación es a través del coeficiente de correlación de la muestra está representado por la letra “r”, la misma que está sometida a pruebas y ensayos a fin establecer el nivel de significancia. (Leon, 2013)

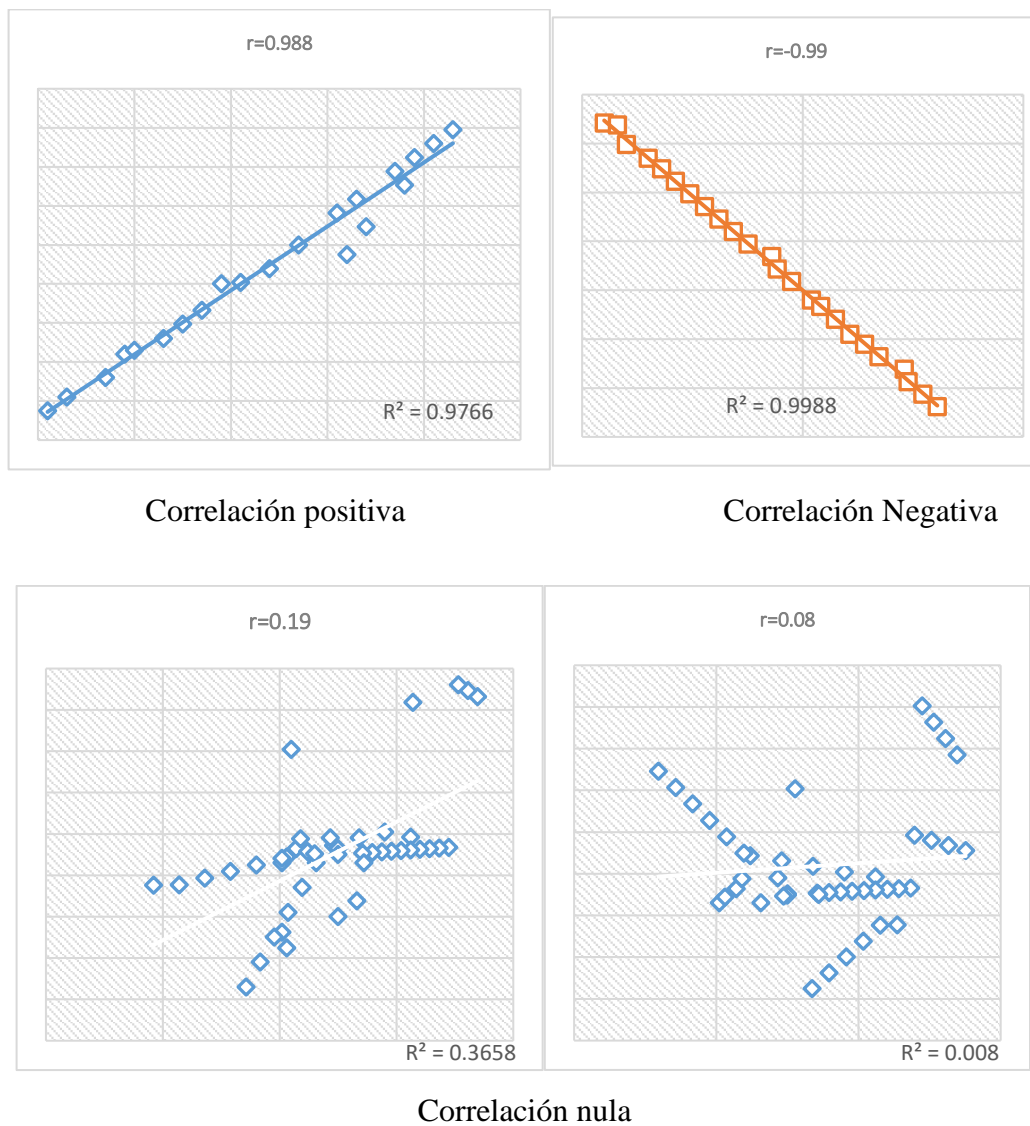
El valor de “r” coeficiente de correlación (Karl Pearson), se encuentra dentro del rango de 1 y -1, el experimento de significación se realiza con la hipótesis nula aduciendo que no hay asociación $r=0$. Asimismo, el valor o magnitud “r” refiere el grado de proporción que existe entre las dos variables, para un valor $r = 0$ refiere que no existe relación entre las dos variables, los valores de 1 y -1 existe una correlación alta positiva o negativa respectivamente, del mismo modo el símbolo (+/-) nos dice la orientación y dirección.

Antes de aplicar este método de correlación lineal se debe realizar siempre la gráfica en una nube de punto entre las dos variables.

En las siguientes ilustraciones se muestra como varia el coeficiente de correlación “r”, además debemos indicar que cada ilustración tiene su nivel significancia de acuerdo a la tabla 14.

Figura 23

Tipos de correlaciones “r”.



Nota: Adaptada de la investigación de prueba de hipótesis (LEON, 2013).

Tabla 14 Relación 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

Nota. adoptada (Correlación y Regresión Empleando Excel y Graph, 2012, pág. 3).

El coeficiente “r” de Karl Pearson está definido por la formula siguiente:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \sum_{i=1}^n X * \sum_{i=1}^n Y}{\sqrt{n * \sum_{i=1}^n X^2 - (\sum_{i=1}^n X)^2} * \sqrt{n \sum_{i=1}^n Y^2 - (\sum_{i=1}^n Y)^2}}$$

3.5.3 Nivel De Significancia O Significación

El nivel de significación o significancia se expresa en términos de probabilidad (0.05 y 0.01) y la distribución muestral también como probabilidad (el área total de ésta como 1.00). Pues bien, para ver si existe o no confianza al generalizar acudimos a la distribución muestral, con una probabilidad adecuada para la investigación. Depende de si elegimos un nivel de 0.05 o de 0.01. Es decir, que nuestro valor estimado en la muestra no se encuentre en el área de riesgo y estemos lejos del valor de la distribución muestral, que insistimos es muy cercano al de la población. Así, el nivel de significación representa áreas de riesgo o confianza en la distribución muestral. (Hernandez, Fernandez , & Baptista, 2014, pág. 303)



“La probabilidad de que un evento ocurra oscila entre cero (0) y uno (1), donde cero implica la imposibilidad de ocurrencia y uno la certeza de que el fenómeno ocurra”.
(Hernandez, Fernandez , & Baptista, 2014, pág. 302)

3.6 PROCEDIMIENTO

Los ensayos de mecánica de suelos para el proyecto, se cumplirá netamente para calcular y estimar las características y propiedades mecánicas de las canteras, los cuales serán empleados como material de la investigación, a fin efectuar el estudio respectivo y comparación de los resultados con las normas vigentes.

3.6.1 Ensayo de caracterización

1. Contenido de humedad MTC E- 108-2000.
2. Análisis granulométrico por tamizado ASTM D-422, MTC E107.
 - Clasificación SUCS ASTM D-2487.
 - Clasificación de Suelos AASHTO M-145, ASTM D-3282.
3. Límites de Atterberg o límites de consistencia.
 - Limite Liquido Malla N° 40 ASTM D-4318, MTC E110.
 - Limite Plástico Malla N° 40 ASTM D-4318, MTC E111.

3.6.2 Ensayo de comportamiento

Prueba o ensayo directamente relacionados a fin de establecer la resistencia y el desgaste del material de cantera.

1. Proctor modificado ASTM D-1557, MTC-E115.
2. Valor relativo de soporte (CBR) ASTM D-1883, MTC E132.
3. Ensayo de Penetrometro Dinámico Ligero (DPL) DIN-4094.
4. Abrasión de los ángeles ASTM T-96.



Los ensayos se desarrollaron en el laboratorio privado de nombre Laboratorios G&C Geotechnick MTL y en el laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la escuela profesional de ingeniería civil de la ciudad de Puno, asimismo cada ensayo y/o prueba se efectuó de acuerdo a las especificaciones técnicas actuales, principalmente las determinadas por la “American Society for Testing Materials” (ASTM) de los “Estados Unidos, las normas del MTC Manual de Ensayo de Materiales” (EM 2000) y la Norma Técnica Peruana, siguiendo el proceso apropiado, claro y entendible.

A. CONTENIDO DE HUMEDAD

Se halló el contenido de humedad de la cantera, el cual se expresa en porcentaje, siguiendo el proceso normado por la ASTM D 653-90, NTP 339.127, MTC E 108-2000, consiguiéndose los datos y resultados respectivos.

Descripción breve del ensayo

Se elige tres muestras de suelo, luego se pesan en una balanza las muestras (humedad) en su estado natural registrando cada uno de sus pesos, luego es trasladado al horno eléctrico a una temperatura constante 105 ± 5 °C por un día, luego se saca las muestras de suelos del horno se hace enfriar la muestra y luego registrar los pesos secos, después se obtiene el porcentaje de contenido de humedad dividiendo el peso húmedo y peso seco del suelo respectivamente.

Figura 24

Ensayo de contenido de humedad.



Nota. En la imagen se muestra los especímenes de las muestras de suelos en su forma natural y el secado en el horno.

B. Análisis granulométrico por tamizado

El propósito es especificar el suelo según las dimensiones y cuerpos de las partículas, designar a que grupos corresponden los suelos gruesos y suelos finos, para evaluar si el suelo está bien o mal graduado, según las normas y siguiendo el procedimiento de la (ASTM D 422, AASTHO T 88, MTC E 107-200).

Descripción del ensayo.

- Antes de iniciar con el ensayo debemos cuartear la muestra de suelo seco, tomar una fracción del cuarteo luego pesarlo como la muestra total de suelo seco, de este modo tenemos la parte representativa de la cantera.
- Luego lavar con agua limpia la muestra representativa a través de la malla o tamiz N° 200, de modo repetitiva a fin de obtener que el agua se note clara, para posteriormente la muestra sea ingresado al horno eléctrico a T° de 105 ± 5 °C, por un lapso mínimo de 18 horas.

Figura 25

Lavado de la muestra de suelo por el tamiz N° 200.



Nota: Lavado de la muestra de suelos para el tamizado.

- Una vez la muestra se halle seca, se ejecuta el tamizado a través del conjunto de tamices ordenados de manera decreciente, removiendo energicamente con movimiento en forma rotatoria de arriba abajo, para después registrar el peso del material retenido en los diferentes tamices.

Figura 26

Ensayo de granulometría por tamizado



Nota. a) Juego de tamices y tamizado, b) agregado grueso y c) agregado fino.



Después de haber ejecutado el análisis granulométrico, se procede a efectuar los ensayos de índices de consistencia.

C. Índices de consistencia

El procedimiento de los ensayos límite líquido y plástico se ha puntualizado en el Capítulo II (se va a desarrollar para las dos canteras de estudio).

C.1 Límite líquido

- Tener en cuenta la normativa y referencias del presente ensayo. (ASTM D 4318 y AASTHO T 89, MTC E 110- 2000).
- Para empezar el presente ensayo debemos tamizar la muestra en la malla o tamiz N° 40 hasta lograr un peso aproximado de 150 a 200 g., además eliminar el material retenido en la malla referida.
- Mezcla la muestra en una bandeja de porcelana o similar con agua, a fin de obtener una pasta condensa, consistente y trabajable, en seguida cubrir la muestra con un plástico o franela y dejarlo reposar durante una hora.
- Poner la muestra desde la bandeja a la cuchara de Casagrande, hasta llenar a un tercio del total aproximadamente.
- Utilizando una espátula se comienza extender y nivelar la muestra, debiendo formar una torta en forma circular de 1 cm., en el punto más profundo.
- Utilizando el ranurador se efectúa un canal a lo largo del diámetro circular de la muestra teniendo como referencia la línea central del equipo de Casa Grande, a fin de evitar la rotura o tajamiento a lo largo del canal de la muestra se realiza ciertas pasadas a fin de no alterar la muestra.

- Luego girar la manija a razón de dos vueltas/seg y registrar el N° de golpes necesarios hasta que las paredes del canal se peguen en el fondo a medida de media pulgada, extraer parte de la muestra para obtener el contenido de humedad.

Figura 27

Ensayo De Limite Liquido



Nota. a) Tamizado de la muestra por la malla N° 40, b) Calibración de la cuchara de Casa Grande y c) Ejecución del ensayo en la cuchara de Casa Grande.

C.2 Limite plástico

- Considerando las normativas vigentes del ensayo debemos tener en cuenta en las normas de la (ASTM D 424 y MTC –E 112-2000).
- Se utiliza el mismo material usado en el límite líquido, considerando que la muestra tenga una firmeza que pueda ser envuelto y/o enrollado en los dedos y palma de la mano y el vidrio pulido.
- Se agarra 2 gr. de muestra aproximadamente y se procede a formar bordones cilíndricos de manera que se pueda rotar sobre el vidrio pulido a fin de quitar la humedad.

- Se comienza con el enrollado, a proporción de (80 a 90) ciclos por minuto aproximadamente.
- El límite plástico, se determina al moldear bordones de 3.2 mm., aprox., de diámetro, en el momento en que se constituyen rajaduras exteriores.

Figura 28

Ensayo De Limite Plástico



Nota. Procedimiento del ensayo de limite plástico.

Posteriormente de haber realizado los ensayos de caracterización de los suelos (contenido de humedad, análisis granulométrico por tamizado e índices de consistencia), se puede procesar, determinar y especificar el tipo y/o clase de suelo de cada una de las canteras

D. Ensayo de abrasión máquina de Los Ángeles

Para el inicio del presente ensayo debemos tener las siguientes consideraciones:

- La muestra de suelo deberá ser lavado y secado en el horno a una T° de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, luego ser tamizada en los tamices correspondientes y juntarlos en las proporciones del método respectivo.

Figura 29

Tamizado de la muestra de suelo en los tamices 1", 3/4", 1/2" y 3/8".



Nota: Adaptada del ensayo de abrasión de Los Ángeles.

- Luego introducir la muestra de suelo juntamente con las cargas abrasivas (esferas) en el equipo de Los Ángeles, en seguida prender el equipo, regulando el número de revoluciones de acuerdo al método adoptado según la granulometría. Para la presente cantera fue por el Método "A".

Figura 30

Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los Ángeles.



Nota. a) Máquina de Los Ángeles, b) Ejecución del ensayo por medio de la máquina de Los Ángeles y c) Extracción del material y las esferas después haber concluido el ensayo.

- Concluido el tiempo de rotación, se extrae el material de suelo (agregado) del equipo de Los Ángeles y luego se comienza a tamizar por el tamiz N° 12.

Figura 31

Tamizado la muestra de suelo por el tamiz N° 12.



Nota. Material tamizado por la malla N° 12, una vez concluido el ensayo.

- La muestra de suelo retenido en el tamiz N° 12, se procede a lavar y secar en el horno eléctrico a T° de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, posteriormente registrar el peso de la muestra en la balanza, a continuación, se proseguí con los cálculos respectivos.

E. Ensayo Proctor modificado

Teniendo en consideración las normativas y normas vigentes ASTM D 1557 Y MTC E- 115-2000, descritos en el Capítulo II, además debemos tener antes las siguientes atenciones para iniciar el presente ensayo.

- Efectuar el ensayo para cada una de las canteras, en su forma natural sin el aditamento de cal, a fin de observar las situaciones primigenias de la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo.

- Para iniciar el ensayo se requiere un aproximadamente de 30 kilogramos de suelo, el mismo que deberá se secado al aire libre de forma natural, extraer los terrones de la muestra de suelo.
- Pasar el material por los tamices $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ ", y N° 4, a fin determinar el método a utilizar respecto a la granulometría realizada por los tamices antes descritos. Para esta cantera se ha determinado emplear el método "C".

Figura 32

Tamizado de la muestra de suelo por los tamices $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ ", y N° 4.



Nota: Tamizado del material de la cantera Alto Puno.

- Se empezó pesando en una balanza muestra de suelo en una bandeja 5.5 kg., aproximadamente, asimismo se le adiciono 2% de agua con respecto al peso del suelo, para luego empezar a mezclar manualmente hasta obtener que el material este uniforme.

- Asimismo, con la ayuda de un vernier debemos obtener las siguientes las medidas del molde diámetro, altura y peso sin el collarín, el cual debe ser registrado y anotado para los cálculos correspondientes.

Figura 33

Registro de las dimensiones D/h y peso del molde de Proctor modificado.



Nota: Anotación de las mediciones del molde de Proctor modificado.

- Una vez la muestra se encuentra ya mezclada en una bandeja debemos partir o dividir en cinco partes iguales y con la ayuda de un cucharón metálico poner en el molde una de las partes de la muestra.
- En seguida se comienza a compactar con el martillo dando la cantidad de número de golpes de acuerdo al método adoptado, proseguir con la compactación con las demás muestras obteniendo 5 capas.
- Una vez concluido con las cinco capas retirar el cuello (collarín) del molde y se comienza a enrasar con el rizador metálico a altura del margen superior del molde.
- Después registrar el peso del molde más el suelo húmedo, extraer la muestra del molde y de la parte media sacar una porción en un recipiente y registrar el peso

de suelo húmedo más el recipiente y ponerlo en el horno eléctrico a una T° de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ para su secado, a fin establecer la humedad del suelo.

Figura 34

Ensayo De Proctor Modificado.



Nota. a) Muestra de suelo mezclado con el agua, b) compactación de la muestra en el molde y c) registro del peso de la muestra húmeda más el molde.

- El proceso relatado en los párrafos anteriores solo es para un punto de la curva de compactación (densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo), para obtener los otros tres puntos más se deberá realizar el procedimiento descrito, variando la cantidad de agua en una proporción de 2% respecto al peso del suelo, de esta manera obtendremos los dos parámetros de la curva de compactación.

De esta manera terminado el procedimiento, se prosiguió a efectuar el ensayo de Proctor modificado adicionando cal en las proporciones 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, continuando con el mismo procedimiento descrito antes descrito.



F. Ensayo del valor relativo de soporte (CBR)

Considerando las normativas y normas vigentes de la ASTM D1883 Y MTC E-132-2000, a fin de obtener el valor relativo de soporte de la cantera en condiciones de densidad controlada. Se ha realizado los CBR para las siguientes proporciones de Cal 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, conforme a continuación se detalla.

- Hallado la humedad optima del ensayo de Proctor modificado se comienza con el ensayo presente para la cantera en su forma natural sin adicionar cal.
- Se toma tres de muestra de suelo con un peso de 5.5 kilogramos, y se prepara tres moldes de CBR, antes de iniciar el ensayo se debe registrar de los moldes el (diámetro, altura y peso del molde sin el collarín).
- Alistar una probeta con la cantidad de agua con relación al porcentaje de contenido de humedad optimo determinada en el ensayo de Proctor modificado para máxima densidad seca, la cantidad de agua debe ser igual para los tres especímenes.
- En una vasija se mezcla el suelo con el agua a fin conseguir un amasado parejo y luego dividir en cinco fracciones iguales.

Figura 35

Mezcla de la muestra de suelo natural con el contenido de humedad óptimo.



Nota. a) Preparación de la muestra de suelo listo para realizar el ensayo, b) División de la muestra de suelo en 5 partes para la compactación.

- Instalar el disco espaciador en el fondo del molde y colocar el papel filtro sobre el mismo, luego poner muestra de suelo para su compactación se da inicio con 56 golpes con el pistón o martillo.
- Retirar el cuello (collarín) del molde y comenzar a enrasar con el razador metálico hasta obtener una superficie plana con respecto a la parte superior del molde.

Figura 36

Ejecución del ensayo de CBR.



Nota: a) Preparación de la muestra de suelo adicionado cal, b) Molde de CBR de 6" con papel y c) Razado del material con una regla metálica.

- Una vez terminado con el enrasado se invierte el molde, retirando el disco espaciador, luego poner un papel filtro en el fondo del molde, en seguida registrar el peso del suelo húmedo y del molde.
- Se procede a colocar los anillos graduables y las placas metálicas sobre la muestra de suelo, el molde es colocado y sumergido en un recipiente o depósito de agua, se ensambla el soporte dial a fin de anotar la lectura inicial.

Figura 37

Saturación de los moldes de CBR durante 96 horas y lecturas con el dial.



Nota: Moldes de CBR embebidos durante 96 horas.

- Se debe continuar con el procedimiento detallado para las dos muestras, con las diferencias de compactación con el N° de golpes de 25 y 12 golpes respectivamente.
- Anotar y ver la lectura del extensómetro (dial) cada 24 horas, transcurrido cuatro días o 96 horas se efectuará la lectura final, a fin computar la expansión de la muestra, la expansión total anotada se enuncia en (%) con respecto a la cota inicial del espécimen.
- Una vez extraído las tres muestras del recipiente o tanque de agua se dejar drenar durante 15 minutos, teniendo en cuenta de no alterar la muestra para luego seguir con el ensayo de penetración.
- Poner el molde en la prensa con la sobrecarga, en seguida bajar el pistón sobre el suelo, luego se deberá verificar el 0.00 en el extensómetro que computa la penetración antes de aplicar la carga.

Figura 38

Lecturas del dial de carga.



Nota: Evaluación de la expansión de la muestra de suelo.

- Teniendo en cuenta la tabla de penetración, introducir a la muestra el pistón a una rapidez constante de penetración de $\frac{1}{2}$ "/min y se va registrando las lecturas del dial de carga en las penetraciones de 0.025", 0.05", 0.075", 0.10", 0.15", 0.20", 0.30, 0.40" y 0.50" .
- Llegado a una penetración de 0.5", se procede a retirar el molde de la prensa, a continuación, se comienza a desechar el material ensayo y limpiar los moldes para los siguientes ensayos.
- Concluido el ensayo de penetración, con los resultados hallados se efectuarán el procesamiento de datos y ensayos para las demás proporciones (2, 4, 6 y 8%) de cal con respecto al peso del suelo conforme a continuación se detalla:



3.6.3 Trabajo preliminar en la vía Puno-Mañazo

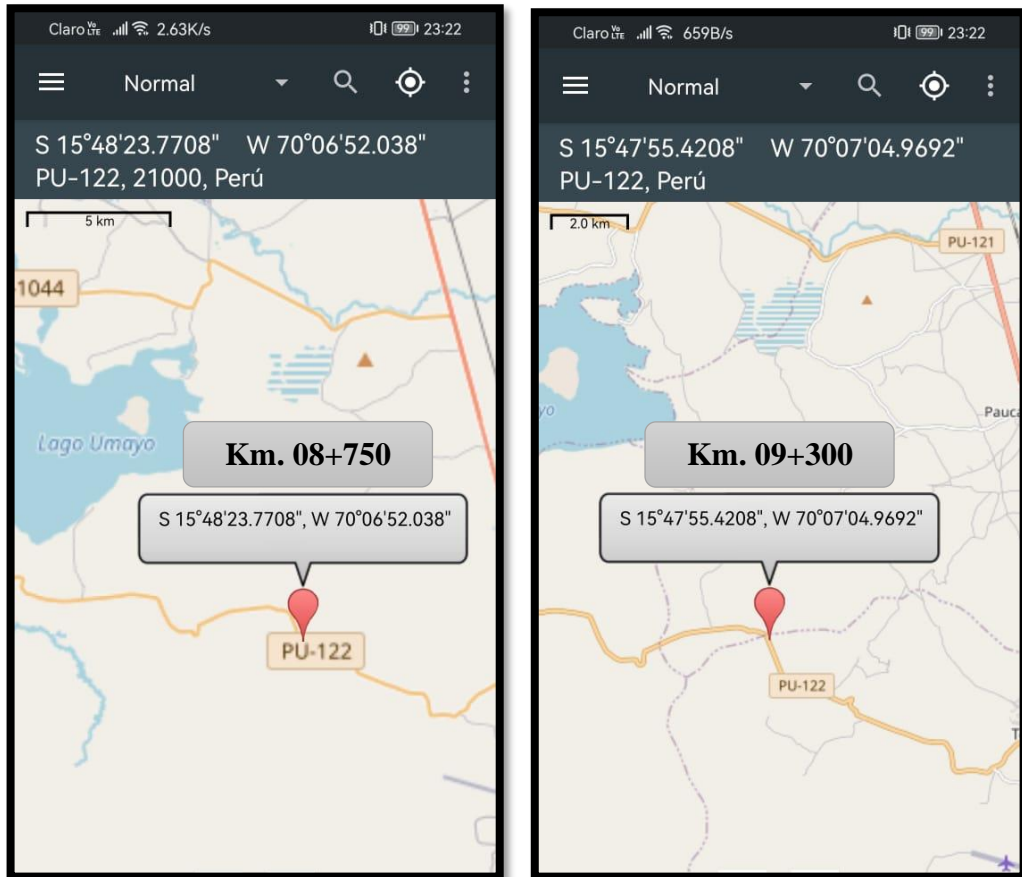
En el trabajo preliminar se realizó dos calicatas para la toma de muestras a un lado de la berma de la vía, a fin de extraer el suelo de la capa de la subbase y realizar el ensayo respectivo, determinar las características y su valor relativo de soporte (CBR) del material, en cuanto al número de calicatas a realizar la norma en sus especificaciones generales del MTC, indica la exploración, reconocimiento y estudio en el campo a lo extenso de la carretera, en cuanto al reconocimiento nos permite asemejar los cortes artificiales y naturales, identificar los tipos de suelos y delimitar las áreas en donde estos tienen particularidades semejantes, observar las bandas de riesgos, por otro la investigación y exploración en el terreno contendrá la realización de calicatas u hoyos exploratorios, la distancia depende netamente de las particularidades de los materiales, generalmente están distanciadas entre 250 m y 2000 m, estos pueden estar más juntos dependerá de la singularidades de los puntos. La norma citada en el presenta párrafo refiere calicatas a realizarse a nivel de subrasante, no especifica para la subbase, por lo que se ha elegido a realizarse 1 calicata por kilómetro tomando en cuenta las especificaciones de la norma, en lugares donde existen las fallas y principalmente con fines de investigación, el procedimiento se efectuó conforme a continuación se detalla:

- Se realizó la exploración del área del terreno a lo extenso de la vía.
- Se procedió al reconocimiento de las calicatas a lo extenso de la vía.
- Se enmarca las zonas de trabajo previendo la seguridad en la vía.
- Se eligió las dos zonas donde se van realizar las calicatas.
- Se limpió el lugar donde se va realizar las calicatas para posteriormente comenzar a escarbar hasta una profundidad de 45 cm aproximadamente.
- Se extendió una manta a fin de depositar el suelo.

- Finalmente, el material es recogido en sacos, en forma proporcional para poder ser trasladado hasta el laboratorio.

Figura 39

Geolocalización de calicatas



Nota: Adaptada del aplicativo “GPS Mapa de Coordenatas” Km. 08+750 y 09+300.

Figura 40

Extracción de muestra de suelo Calicata N° 1 Km 08 + 750



Nota. a) Marcado de la calicata C-1, b) Inicio del escarbado con pico y pala c) Extracción del material y d) Recolección de muestra para ensayo de laboratorio.

Figura 41

Extracción de muestra de suelo Calicata N° 2 Km 09 + 300



Nota. a) Marcado de la calicata C-1, b) Inicio del escarbado con pico y pala c) Extracción del material y d) Recolección de muestra para ensayo de laboratorio.

3.6.4 Trabajo de campo en las canteras

En el trabajo de campo, se efectuó la labor de toma de muestras de la cantera antes referida, eligiendo dos formas de muestreo, primero el muestreo en las zonas aun no alteradas en donde se realizó calicatas conforme a continuación se detalla:

- Se eligieron las zonas en el cual se harán y ejecutarán las calicatas.
- Luego empecé a extraer la capa vegetal del suelo, este proceso es llamado desbroce.



- Escarbe la calicata hasta una hondura aproximada de 1.50 m con diámetro adecuado a fin de extraer el material.
- Se tendió una manta impenetrable al pie de la inclinación de la calicata.
- En seguida con la ayuda de un pico se excava un canal desde la parte superior hasta el fondo de la calita haciendo caer el material a la manta tendida.
- Por último, se extrae el material poniendo en sacos de manera proporcional a fin de ser transportados hasta el laboratorio.

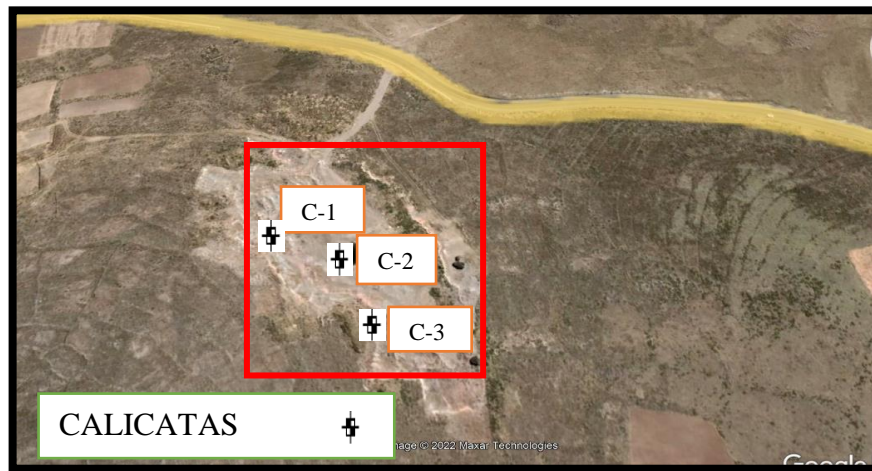
Para el segundo tipo de muestro, el material fue sacado del tajo abierto de la cantera, dado que anteriormente la cantera ya fue explotada. De igual manera se obtuvo un patrón de suelo inalterado en cantidades propias, el cual fue llevado al laboratorio de suelos para los análisis y ensayos correspondientes en una cantidad 270 Kg. A fin de efectuar los ensayos siguientes: clasificación de suelos, índices de consistencia, Proctor modificado, CBR y Abrasión de los Ángeles.

Como parte del proceso y programa de explotación de geotecnia se cumplieron las siguientes actividades.

En la cantera de Alto Totorani, se efectuaron tres (03) calicatas con las siguientes nominaciones C-1, C-2 y C-3 con una profundidad aproximada de 1.50 m, obteniendo 270 Kg. De muestra de suelo inalterado, en la figura siguiente se muestra las diferentes calicatas:

Figura 42

Ubicación de las Calitas C-1, C-2 y C-3.



Nota: Adaptada del aplicativo Google Earth.

En la figura 43, se detalla las labores ejecutadas en las calitas en campo abierto.

Figura 43

Exploración, muestreo y extracción material de la Cantera Alto Puno.



Nota. Material de la Cantera Alto Puno para ensayo de laboratorio.



Una vez obtenido y recabada la muestra de suelo fueron conducidas hasta el laboratorio de suelos, a fin de realizar los ensayos correspondientes.

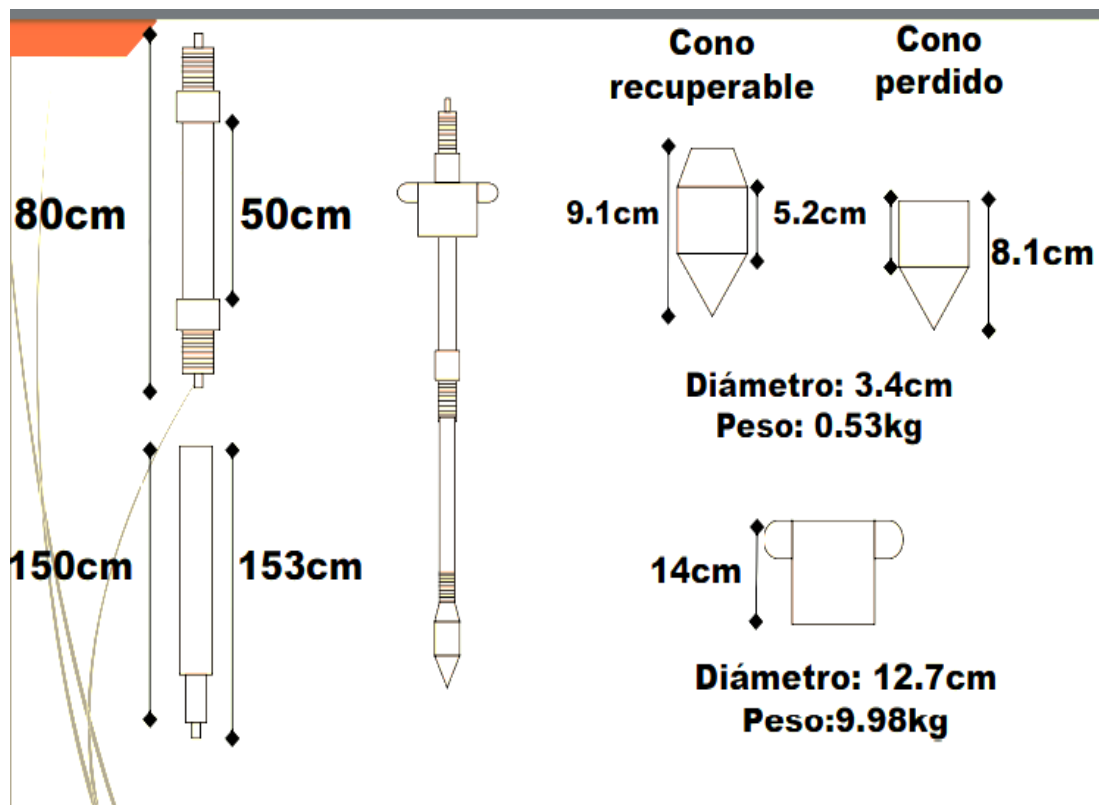
3.6.5 Ensayo de penetrómetro dinámico ligero (DPL)

Considerando las Norma Técnica Peruana (NTP) 339.159 y DIN 4049, descrito en el capítulo II, se dio inicio al ensayo respectivo teniendo en cuenta el procedimiento siguiente:

- La prueba consiste en un hincado continuo en tramos de 10 cm., de una punta cónica de metal y un martillo de 10 kg. Caído de desde una altura de 50 cm.
- La barra de acero de diámetro 3.4 cm, la punta cónica de diámetro de 2.0 cm. y un ángulo de abertura de 60°.
- El ensayo DPL se realizó in situ en el ras de la subrasante en el tramo KM. 08+000 al 10+000 en la vía Puno – Mañazo, en tres puntos distintos del tramo referido.
- Se procedió a limpiar la zona de trabajo retirando material orgánico y otros objetos que pueden interferir en el ensayo.
- Se comienza a acoplar el equipo DPL, en el área de trabajo teniendo marcado la barra de acero cada 10 cm.
- Se coloca el equipo DPL en forme vertical a fin de dar inicio al ensayo.
- Se comienza a contabilizar y registrar el número de golpes cada 10 cm., para alcanzar mayor profundidad se debe ensamblar una segunda barra de acero y así sucesivamente.

Figura 44

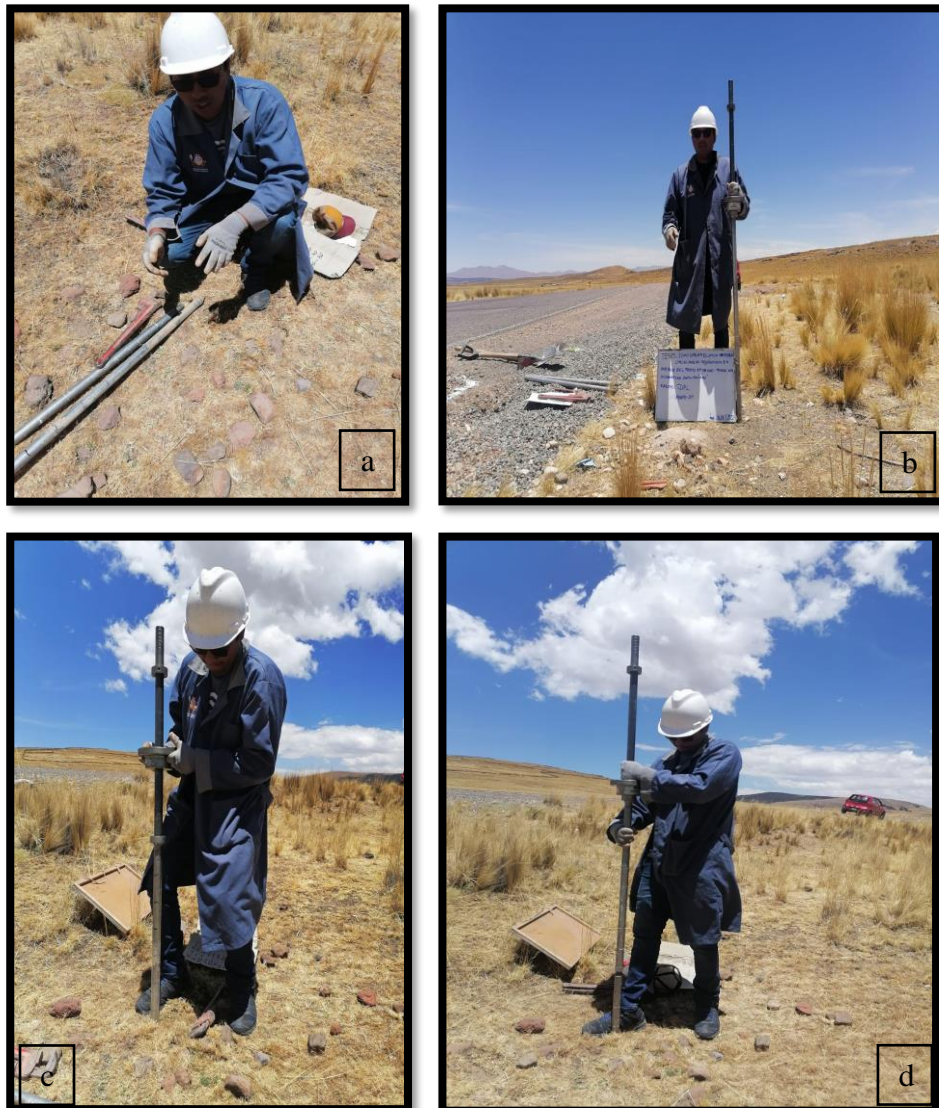
Dimensiones del equipo DPL



Nota. adaptada del equipo del laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la EPIC.

Figura 45

Procedimiento de ensayo de DPL.



Nota. a) Ensamblado del equipo DPL, b) Ubicación y área del ensayo, c) Procedimiento del ensayo DPL y d) Articulación de otra barra de acero a fin de alcanzar mayor profundidad.

Cálculos

El valor DPL está determinado por la profundidad auscultada por el número de golpes (mm/Nro. Golpes).

$$DPL = \frac{\text{Profundidad(mm)}}{\text{numero de golpes}} (K)$$



Donde:

DPL: Valor del Penetrometro dinámico ligero.

K: Valor del peso del martillo

Se debe tener cuenta el peso del martillo:

Si el peso del martillo es 8 Kg. El valor K=1

Si el peso del martillo es 10 Kg. El valor K=1.25

A continuación, la tabla 21 se señala las correlaciones del ensayo DPL y CBR siguiente:

Tabla 15 Resumen de expresiones para correlacionar el número DPL con CBR.

Relación entre DPL (mm/golpe)	Ecuación	Autor/Autores	Observaciones
	$CBR = \frac{292}{DPL^{1.12}}$	Van Vuren (1968), Kleyn (1975), Livneh e Ishai(1987)	Apto para tipo de suelos (granulares y cohesivos)
Valor Relativo de Soporte (CBR) %	$Log(CBR) = 2.317 - 0.858Log(CBR)$	Transport Road Research TRRL (1986)	Apto para tipo de suelos
	$CBR = \frac{1}{0.002871 * DPL}$	Webster S.L. et al. (1994)	Para Suelos CH
	$CBR = \frac{1}{(0.017019 * DPL)^2}$	Webster S.L. et al. (1994)	Para suelos CL con CBR < 10%

Nota. Adaptada de la revista (El Cono Dinamico de Penetracion y su Aplicacion en la Evaluacion de Suelos, 2005)

3.7 LAS VARIABLES

Definición de variables

- Variable independiente

X1: Suelo (patrón)

- Variable dependiente

Y1: Cal (Actuación de la propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado con cal).



3.7.1 Tipo y diseño de investigación

La investigación pertenece al grado experimental, ya que se ejecutará un simulacro de ensayos en laboratorio de la combinación de cal con el suelo de la cantera definida. En el ensayo se manipulará la variable independiente, cal al cual se hará los incrementos escalonados hasta obtener las diferenciaciones que se muestran a las propiedades y características mecánicas del suelo el mismo que representa la variable dependiente.

3.7.2 Diseño

El diseño de investigación corresponde a dos canteras con diferentes tratamientos y con post prueba.

3.7.3 Matriz de consistencia

Tabla 16 *Matriz de consistencia.*

MATRIZ DE CONSISTENCIA METODOLÓGICA

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	VARIABLES	Dimensiones	Indicadores	Fuentes de recolección de datos	Metodología	Población y muestra
¿Cuál será la proporción óptima de cal al mezclar el suelo natural de la cantera de Alto Puno con la cal, para la estabilización química de suelo para el mejoramiento de la sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la carretera Puno – Mañazo?	Determinar la óptima proporción y porcentaje adecuado de cal, para la estabilización química de suelo para el mejoramiento de la sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la Carretera Puno – Mañazo.	Al mezclar el suelo natural (cantera de Alto Puno) y el aditivo cal en su óptima proporción, incrementa las propiedades mecánicas	Propiedades mecánicas	Valor Relativo de soporte CBR	%	Equipo de Penetración Dinámica Ligera	Ensayo In situ	Universo: Suelos de la Vía Puno - Mañazo.
				Ensayo de Penetración Dinámica ligera (DPL)	Nro. De Golpes	Equipo de CBR	Ensayo en laboratorio	Muestra: Canteras Alto Puno y Salcedo
				Granulometría	%	Equipo de mecánica de suelos (tamices, cuchara de Casa Grande y otros)	Ensayo en laboratorio	Unidad de análisis: Suelos de la Cantera de Alto Puno y Salcedo.
			Caracterización del suelo	Índices de Consistencia	%			Ensayos DPL in situ
				Contenido de humedad	%			Calicatas y toma de muestras para ensayo CBR y características físicas mecánicas



3.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.8.1 Calculo de valor relativo de soporte (CBR) cantera de Alto Puno

a) Calculo del contenido de humedad de optimo y la densidad máxima seca.

a.1) Determinación De La Densidad Del Suelo Húmedo

Volúmenes de los moldes (cm³).

Altura del molde 1 = 11.620 cm

Diámetro 1 = 15.210 cm

Altura del molde 2 = 11.662 cm

Diámetro 2 = 15.202 cm

Altura del molde 3 = 11.633 cm

Diámetro 3 = 15.215 cm

Altura del molde 4 = 11.638 cm

Diámetro 4 = 15.209 cm

$$\text{Volumen 1, 2, 3 y 4} = \frac{\pi D^2 h}{4} = \frac{3.1416 * 15.21^2 * 11.64}{4}$$

$$\text{Volumen}_{(1,2,3 \text{ y } 4)} = 2114.37 \text{ cm}^3. (1)$$

Tabla 17 Datos densidad de suelo húmedo del ensayo Proctor

Peso Suelo Húmedo + Molde (2)	gr.	13708	13404	13774	13650
Peso del Molde (3)	gr.	9063	9063	9063	9063
Peso del Suelo Húmedo (2-3)=4	gr.	4645	4341	4711	4587
Densidad del Suelo Húmedo (4/1)	gr/cc	2.20	2.05	2.23	2.17

a.2) Peso Suelo Húmedo más molde

Molde N° 1 = 13708 gr

Molde N° 2 = 13404 gr

Molde N° 3 = 13774 gr

Molde N° 4 = 13650 gr



a.3) Peso del molde

Molde N° 1 = 9063 gr

Molde N° 2 = 9063 gr

Molde N° 3 = 9063 gr

Molde N° 4 = 9063 gr

a.4) Peso del Suelo Húmedo

Peso del Suelo Húmedo 1 = 13708 gr - 9063 gr = 4645 gr

Peso del Suelo Húmedo 2 = 13404 gr - 9063 gr = 4341 gr

Peso del Suelo Húmedo 3 = 13774 gr - 9063 gr = 4711 gr

Peso del Suelo Húmedo 4 = 13650 gr - 9063 gr = 4587 gr

a.5) Densidad De Suelo Húmedo

Densidad De Suelo Húmedo 1 = $\frac{4645}{2114.37} = 2.20 \text{ gr} / \text{cm}^3$

Densidad De Suelo Húmedo 2 = $\frac{4341}{2114.37} = 2.05 \text{ gr} / \text{cm}^3$

Densidad De Suelo Húmedo 3 = $\frac{4711}{2114.37} = 2.23 \text{ gr} / \text{cm}^3$

Densidad De Suelo Húmedo 4 = $\frac{4587}{2114.37} = 2.17 \text{ gr} / \text{cm}^3$

a.6) Determinación De La Densidad Del Suelo Seco

Tabla 18 Datos De La Densidad Del Suelo Seco y contenido de humedad.

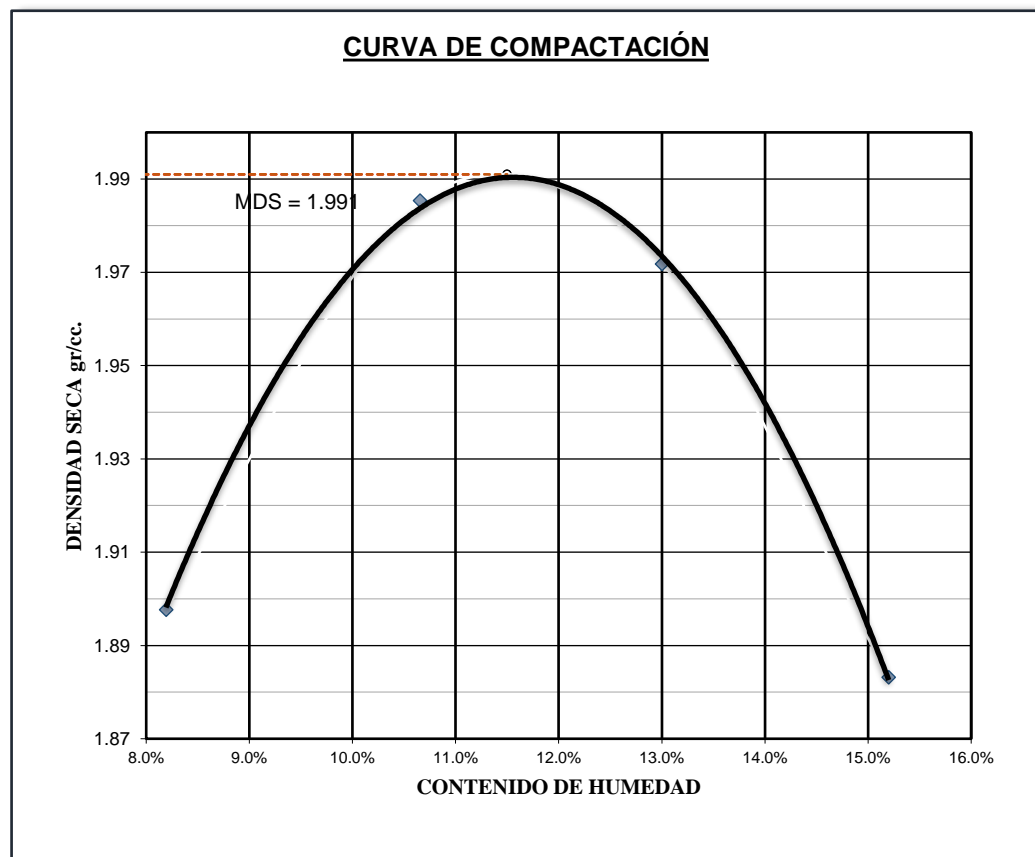
Nº TARA		H-30	P-08	N-10	H-02
Peso de la Tara	gr.	43.16	47.67	46.67	47.36
Peso del Suelo Húmedo + Tara	gr.	420.48	445.09	281.29	290.18
Peso del Suelo Seco + Tara	gr.	384.15	415.00	255.68	260.00
Peso del Agua	gr.	36.33	30.09	25.61	30.18
Peso del Suelo Seco	gr.	340.99	367.33	209.01	212.64
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	10.65	8.19	13.00	15.20
DENSIDAD SECA DEL SUELO	gr/cc	1.985	1.898	1.972	1.883

MÉTODO : C **MÁXIMA DENSIDAD SECA :** **1.991 gr/cc**
HUMEDAD OPTIMA **:** **11.50 %**

Nota: Adaptada del ensayo de CBR.

Figura 46

Curva de Compactación Máxima Densidad Seca Y Contenido De Humedad Optimo.



Nota. Adaptada del ensayo de Proctor Modificado.



b) CALCULO DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE CBR

Tabla 19 Datos para el cálculo densidad de suelo húmedo y seco

MOLDE No	08/25		HP		A-20		
	No DE CAPAS		5		5		
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	56		25		12		
CONDICIONES DE LA MUESTRA	SIN SATURAR	SATURADO	SIN SATURAR	SATURADO	SIN SATURAR	SATURADO	
	Peso Suelo Húmedo + Molde	gr.	11644	11660	12815	12864	12053
Peso del Molde	gr.	6845	6845	8229	8229	7726	7726
Peso del Suelo Húmedo	gr.	4799	4815	4586	4635	4327	4465
Volumen del Suelo	cc.	2121	2121	2122	2122	2123	2123
Densidad del Suelo Húmedo	gr/cc.	2.263	2.270	2.162	2.185	2.038	2.103
Capsula No	No	H-020	P-09	P-08	P-07	110	108
Suelo Húmedo + Capsula	gr.	253.86	280.13	240.01	362.65	180.81	291.81
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	233.33	253.77	220.21	327.83	167.35	257.33
Peso del Agua	gr.	20.53	26.36	19.80	34.82	13.46	34.48
Peso de la Capsula	gr.	49.48	45.50	47.33	57.59	47.40	46.73
Peso del Suelo Seco	gr.	183.85	208.27	172.88	270.24	119.95	210.60
% de Humedad	%	11.17%	12.66%	11.45%	12.88%	11.22%	16.37%
Promedio de Humedad	%	11.17%	12.66%	11.45%	12.88%	11.22%	16.37%
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	2.036	2.015	1.939	1.935	1.832	1.807

Nota: Adaptada del ensayo del valor relativo de soporte (CBR).

Datos para calcular el volumen del suelo, teniendo cuenta los datos del molde

Diámetro del molde = 15.22 cm

Altura del molde = 11.68 cm

$$\text{Volumen del suelo} = \frac{3.1416 * 15.22^2 * 11.68}{4}$$

Volumen del suelo = 2123 cm³

c) Calculo de la expansión

Tabla 20 *Calculo de expansión de CBR*

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	Expansión	
				mm	%		mm	%		mm	%
17/06/2021	6:00pm	0	7.669	0.00	0.00	7.410	0.00	0.00	7.793	0.00	0.00
18/06/2021	6:15pm	24h	7.669	0.00	0.00	7.411	0.00	0.00	7.798	0.00	0.00
19/06/2021	6:13pm	62h	7.670	0.00	0.00	7.412	0.00	0.00	7.804	0.01	0.00
20/06/2021	6:12pm	88h	7.670	0.00	0.00	7.414	0.00	0.00	7.806	0.01	0.01

Nota: Adaptada del ensayo del valor relativo de soporte (CBR)

% expansión = (lectura inicial – lectura final) *100/116.8 mm

% expansión = (7.669 – 7.670) *100/65.7

% expansión = - 0.001 mm (el procedimiento se realiza para cada de los ensayos)

d) Penetración

Tabla 21 *Calculo del CBR del suelo*

Pulgadas	Penetración (mm)	Tiempo (Seg)	Carga Est.	MOLDE No 08/25				MOLDE No HP				MOLDE No A-20			
				Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.
0	0	00:00		0.0	0.0	0.0		0.0	0.00			0.0	0.00		
0.0250	0.63	00:30		71.2	3.7	48.2		2.49			69.2	3.57			
0.0500	1.27	01:00		170.3	8.8	154.2		7.95			134.2	6.92			
0.0750	1.91	01:30		288.4	14.9	235.6		12.14			197.2	10.16			
0.1000	2.54	02:00	70.31	415.5	21.4	30	355.9	18.34	26	275.3	14.19	20			
0.1250	3.17	02:30		589.6	30.4	468.9		24.17			356.2	18.36			
0.1500	3.81	03:00		805.0	41.5	641.3		33.05			399.6	20.60			
0.2000	5.09	04:00	105.00	1125.6	58.0	55	890.2	45.89	44	459.6	23.69	23			
0.2500	6.35	05:00		1510.2	77.8	1141.8		58.86			527.8	27.21			
0.3000	7.62	06:00		1935.5	99.8	1334.3		68.78			590.3	30.43			
0.3500	8.89	07:00		2139.5	110.3	1499.3		77.28			650.9	33.55			
0.4000	10.16	08:00		2336.3	120.4	1641.2		84.60			712.40	36.72			
0.5000	12.7	10:00		2525.5	130.2	1995.8		102.88			836.50	43.12			

Nota: Adaptada del ensayo del valor relativo de soporte (CBR)

Análisis para una Penetración de 2.54mm o una pulgada

Lectura de la prensa 415.50 kg. (convertido)

Área del pistón de penetración = 19.783 cm²



$$\text{Carga unitaria del ensayo} = \frac{415.50}{19.783} = 21.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Índice de CBR} = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga Unitaria Patrón}} * 100\%$$

$$\text{CBR} = \frac{21.42 \text{ kg/cm}^2}{70.31 \text{ kg/cm}^2} = 30\% \quad (\text{Para 56 golpes de compactación})$$

$$\text{CBR} = \frac{18.34 \text{ kg/cm}^2}{70.31 \text{ kg/cm}^2} = 26\% \quad (\text{Para 25 golpes de compactación})$$

$$\text{CBR} = \frac{14.19 \text{ kg/cm}^2}{70.31 \text{ kg/cm}^2} = 20\% \quad (\text{Para 12 golpes de compactación})$$

El cálculo realizado en este último párrafo se nota que el CBR de la muestra de suelo sin la adición de Cal, alcanza un valor de CBR de 30 %, por lo que debemos mejorar el suelo adicionando el aditivo Cal, para lo cual se realizara en proporciones ya determinadas.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Situaciones Preliminares De Las Canteras

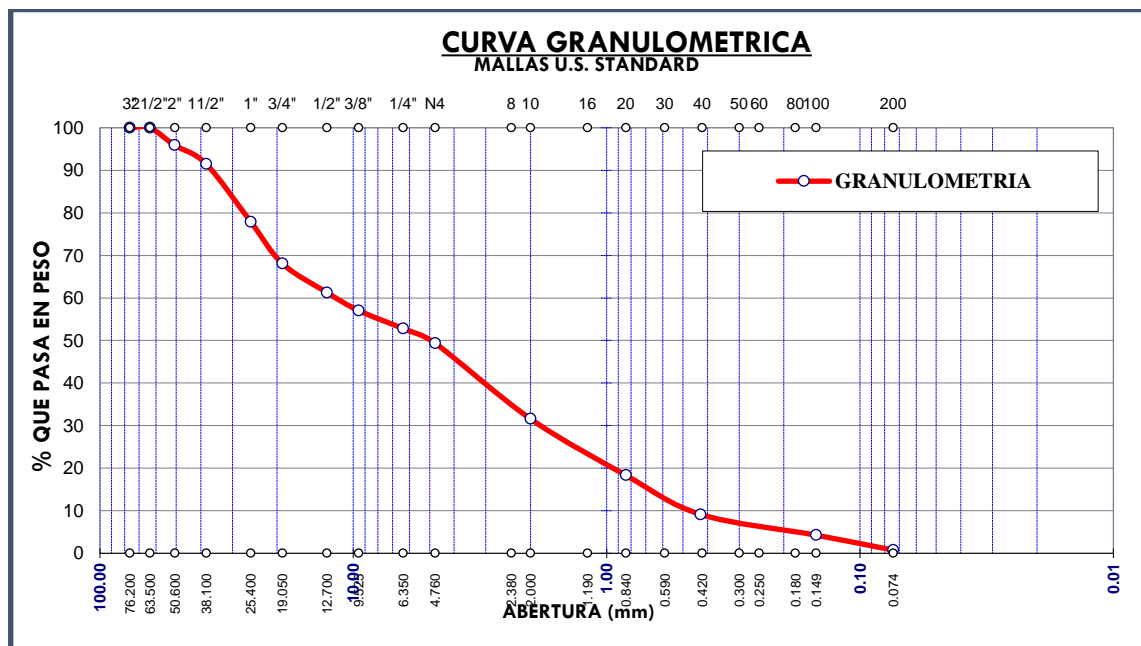
4.1.2 Cálculos de los ensayos y pruebas realizadas

4.1.2.1 Análisis Granulométrico Por Tamizado

a) **Cantera Alto Puno.** – En la figura se muestra la curva granulométrica.

Figura 47

Curva Granulométrica De La Cantera De Alto Puno.

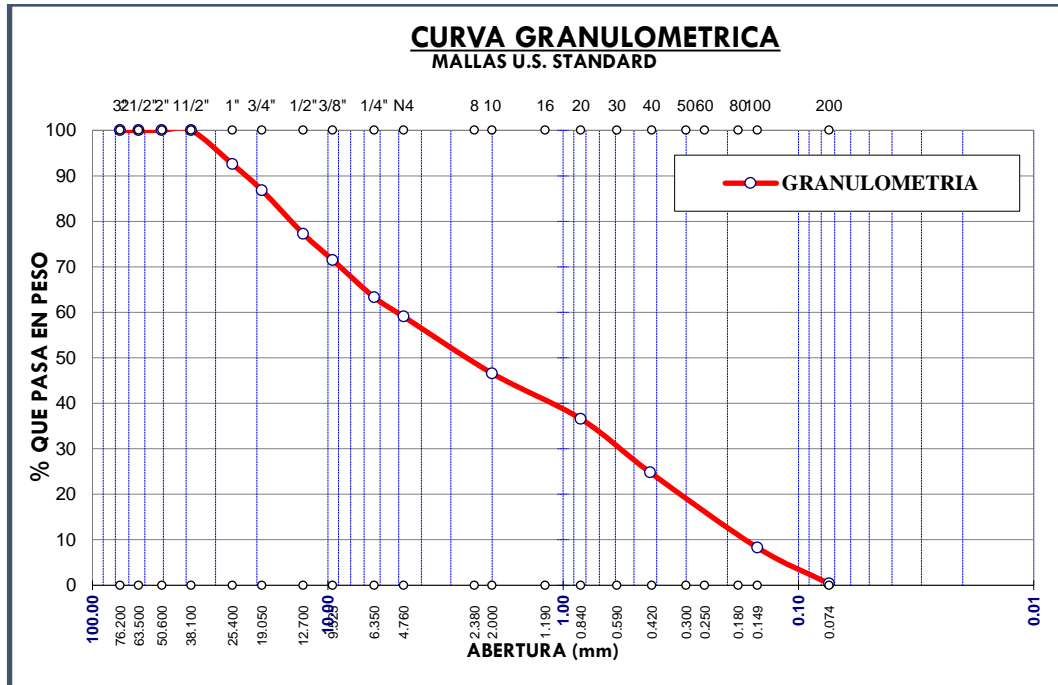


Nota. Adaptada del ensayo de granulometría por tamizado.

b) **Cantera salcedo.** - En la figura se muestra la curva granulométrica.

Figura 48

Curva Granulométrica De La Cantera De Salcedo

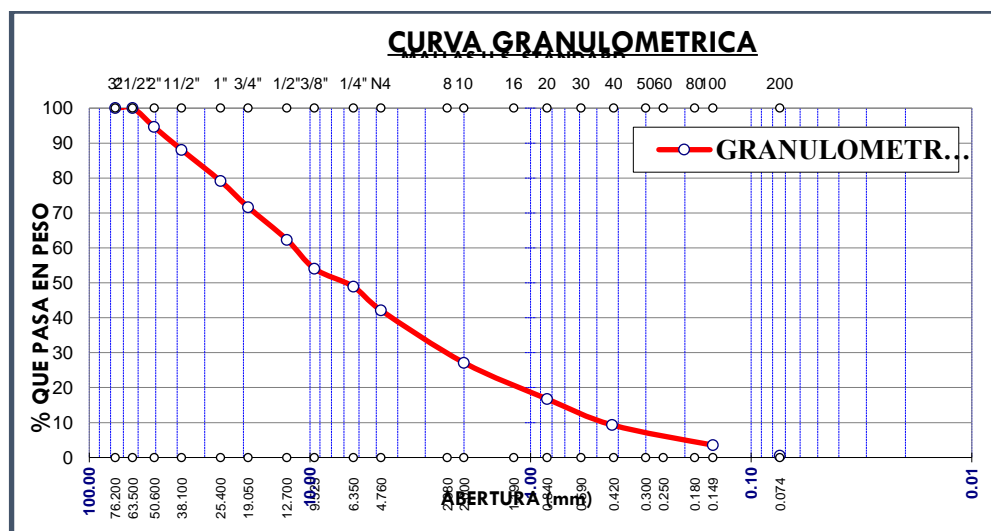


Nota. Adaptada del ensayo de granulometría por tamizado.

c) **Material de la subbase de la vía Puno Mañazo.** Curva granulométrica

Figura 49

Curva Granulométrica de la vía Puno Mañazo.





4.1.2.2 Índices de consistencia

a) Cantera de Alto Puno.

Tabla 22 *Resumen De Límites de Atterberg de la Cantera de Alto Puno*

CANTERA ALTO PUNO	Suelo Natural
Limite Liquido	L.L. = 29.46 %
Limite Plástico	L.P. = 25.48 %
Índice De Plasticidad	L.P. = 3.98 %

Nota: adaptada del ensayo de los índices de consistencia.

b) Cantera de Salcedo.

Tabla 23 *Resumen De Límites de Atterberg de la Cantera de Salcedo.*

CANTERA SALCEDO	Suelo Natural
Limite Liquido	L.L. = 27.06 %
Limite Plástico	L.P. = 17.50 %
Índice De Plasticidad	I.P. = 9.56 %

Nota: Adaptada del ensayo de índices de consistencia.

c) Material de la subbase de la vía Puno Mañazo.

Tabla 24 *Resumen De Límites de Atterberg de la Muestra de la vía Puno Mañazo.*

Material de la vía Puno-Mañazo.	Suelo Natural
Limite Liquido	L.L. = 32.20 %
Limite Plástico	L.P. = 26.38 %
Índice De Plasticidad	I.P. = 5.83 %

Nota: Adaptada del ensayo de índices de consistencia.

4.1.2.3 Prueba de abrasión de Los Ángeles

a) Cantera de Alto Puno.

Tabla 25 Proporción de desgaste del material (%) de la cantera de Alto Puno sin la adición de Cal.

CANTERA ALTO PUNO	PORCENTAJE DE CAL 0%
DETALLE	RESULTADO
Uniformidad	0.18
Abrasión	49.04%

Nota: Adaptada del ensayo de abrasión de Los Ángeles.

4.1.2.4 Proctor modificado

a) Cantera de Alto Puno.

Tabla 26 Detalle de la Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo del material de Cantera de Alto Puno sin la adición de Cal.

CANTERA ALTO PUNO	PORCENTAJE DE CAL 0%
Máxima Densidad Seca	1.991 gr/cc
Contenido de Humedad Optimo	11.50 %

Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.

b) Cantera Salcedo.

Tabla 27 Detalle de la Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo del material de Cantera de Salcedo sin la adición de Cal.

CANTERA SALCEDO	SUELO NATURAL
Máxima Densidad Seca	2.05 gr/cc
Contenido de Humedad Optimo	8.90 %

Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.



c) Material de la subbase de la vía Puno Mañazo.

Tabla 28 *Detalle de la Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo del material de la vía.*

Material de la vía Puno Mañazo KM. 08+750.	SUELO NATURAL
Máxima Densidad Seca	2.00 gr/cc
Contenido de Humedad Óptimo	11.52 %

Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.

Tabla 29 *Detalle de la Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo del material de la vía Puno Mañazo.*

Material de la vía Puno Mañazo KM. 09+300.	SUELO NATURAL
Máxima Densidad Seca	1.986 gr/cc
Contenido de Humedad Óptimo	11.89 %

Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.

4.1.2.5 Valor relativo de soporte (CBR)

a) Cantera de Alto Puno.

Tabla 30 *Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de Cantera de Alto Puno sin la adición de Cal.*

CANTERA ALTO PUNO	PORCENTAJE DE CAL 0%	
PROPIEDAD	NUMERO DEL GOLPES	CAL 0%
	12	20
CBR (%)	25	26
	56	30

Nota: Adaptada del ensayo del valor relativo de soporte.



b) Cantera de Salcedo.

Tabla 31 Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de Cantera de Salcedo sin la adición de Cal.

CANTERA SALCEDO		PORCENTAJE DE CAL 0%
PROPIEDAD	NUMERO DEL GOLPES	CAL 0%
	12	2
CBR (%)	25	3
	56	7

Nota: Adaptada del ensayo del valor relativo de soporte.

c) Material de la subbase de la vía Puno Mañazo.

Tabla 32 Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de subbase de la vía Puno Mañazo.

Material de la Vía Puno Mañazo KM 08+750		PORCENTAJE %
PROPIEDAD	NUMERO DEL GOLPES	Suelo Natural
	12	17
CBR (%)	25	24
	56	32

Nota: Adaptada del ensayo del valor relativo de soporte.

Tabla 33 Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de subbase de la vía Puno Mañazo.

Material de la Vía Puno Mañazo Km. 09+300		PORCENTAJE %
PROPIEDAD	NUMERO DEL GOLPES	Suelo Natural
	12	16
CBR (%)	25	22
	56	28

Nota: Adaptada del ensayo del valor relativo de soporte.

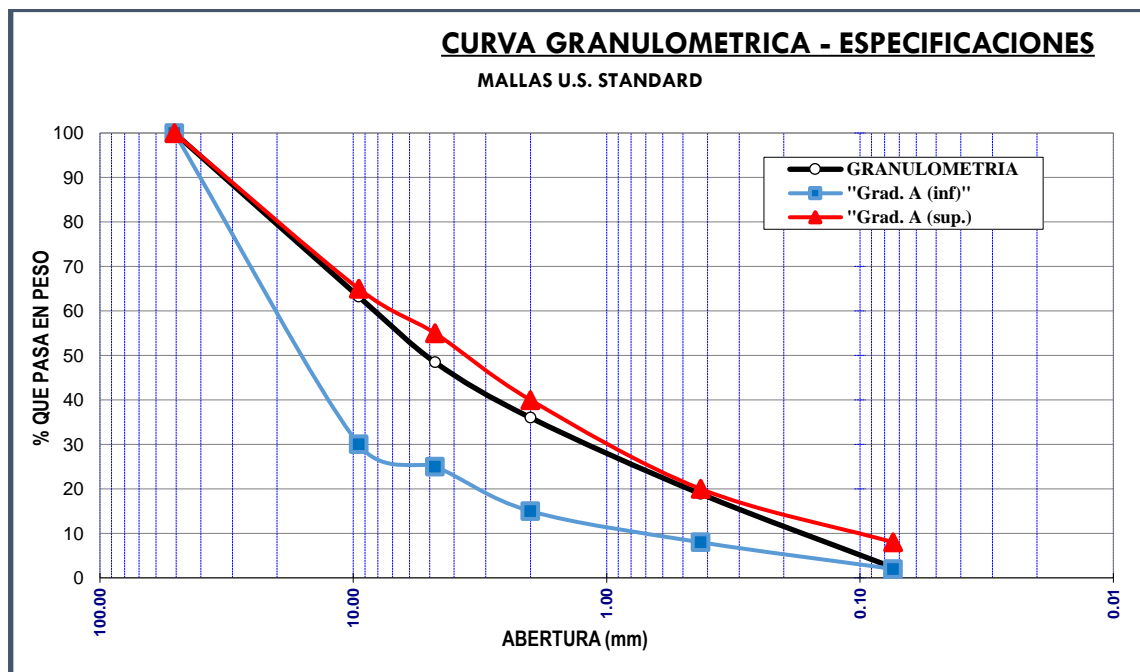
4.1.3 Análisis De Los Resultados

4.1.3.1 Análisis Granulométrico Por Tamizado

- a) **Cantera Alto Puno.** - A continuación, en la figura se presenta un cotejo entre la gradación solicitada para la conformación de la Subbase para materiales granulares. Rangos establecidos por la EG 2013 del MTC.

Figura 50

Verificación entre la Curva Granulométrica de la Cantera Alto Puno y el nivel especificado por la EG 2013 con la Gradación "A".



Nota. La curva de gradación "A" deberá utilizarse en jurisdicciones cuya elevación sea semejante o superior a 3000 m.s.n.m.

De esta manera se muestra en la figura 50, la curva granulométrica de la cantera de Alto Puno, el cual se halla dentro de los límites de la gradación "A" tipificado por la norma EG 2013, por tanto, esta cantera se encontraría apta para la capa Subbase.

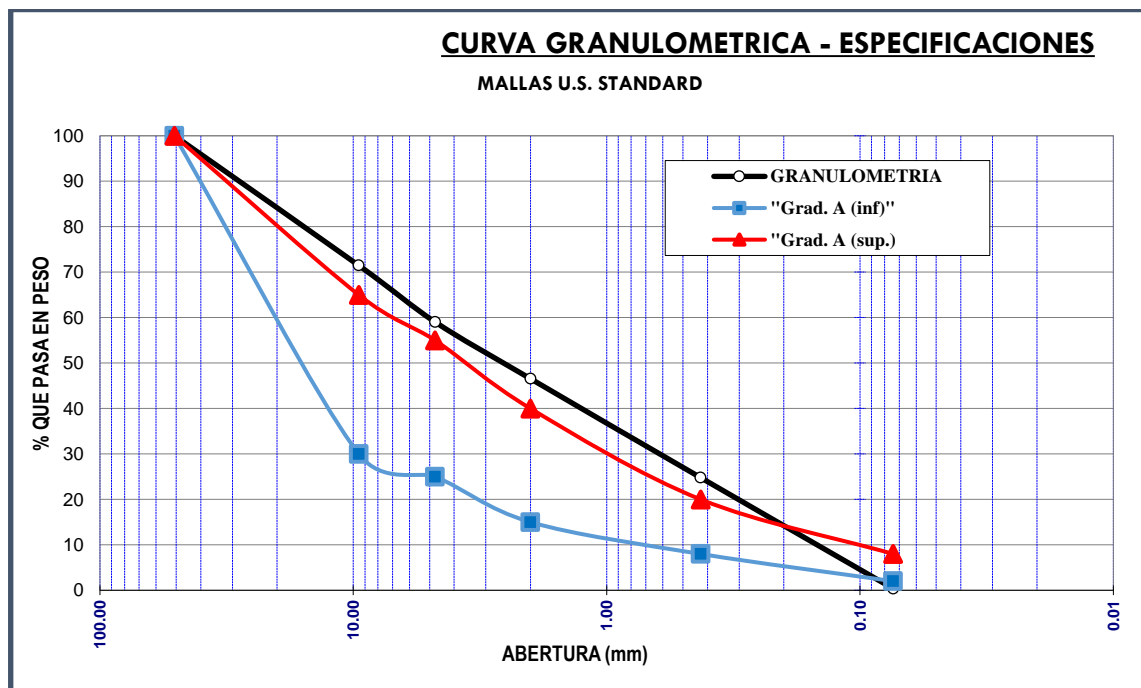
La presente curva granulométrica se ha realizado con el material de la Cantera de Alto Puno con su representación natural sin la adición de Cal, teniendo en consideración

que la añadidura de Cal es netamente para mejorar de las propiedades de su valor relativo de soporte (CBR).

b) Cantera Salcedo.

Figura 51

Verificación entre la Curva Granulométrica de la Cantera Salcedo y el nivel especificado por la EG-2013 con la Gradación "A".



Nota. La curva de gradación "A" deberá utilizarse en jurisdicciones cuya elevación sea semejante o superior a 3000 m.s.n.m.

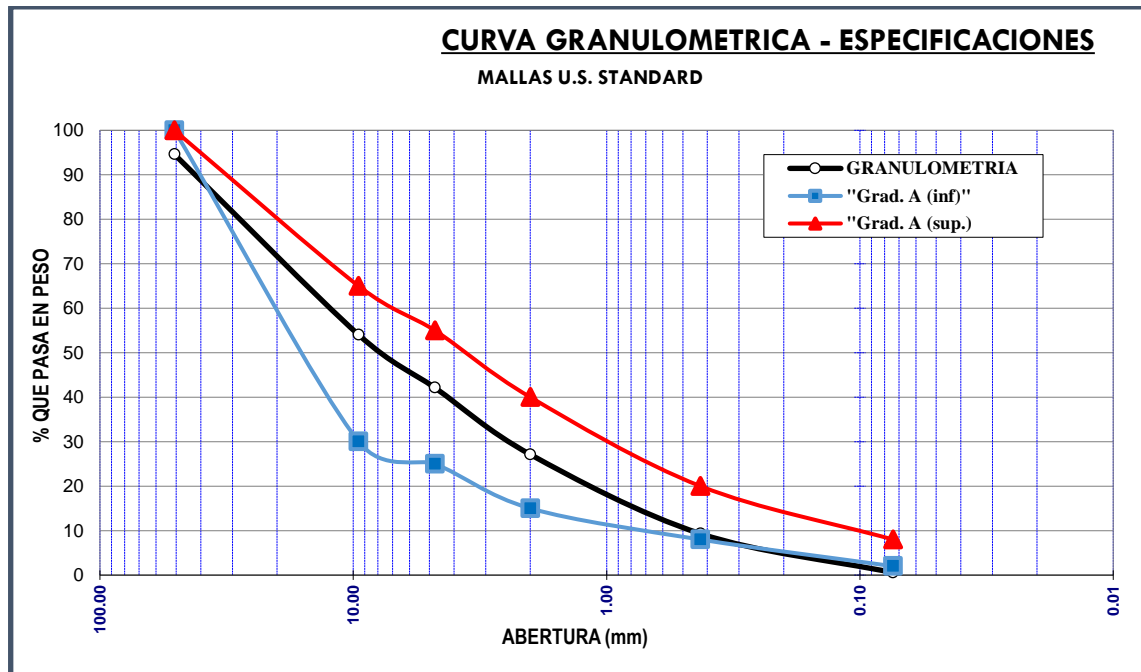
De esta manera se muestra en la figura 51, la curva granulométrica de la cantera de Salcedo, el cual está fuera de los límites de la gradación "A" tipificado por la norma EG-2013, por tanto, esta cantera se encontraría como no apta para la capa subbase.

De la misma forma la presente curva granulométrica se ha realizado con la muestra de suelo de la Cantera de Salcedo en su forma natural sin la añadidura de Cal, teniendo en consideración que la adición de Cal es netamente para mejorar las propiedades de su valor relativo de soporte (CBR).

c) Material de la subbase de la vía Puno Mañazo.

Figura 52

Verificación entre la Curva Granulométrica del material de la vía Puno Mañazo y el nivel especificado por la EG-2013 con la Gradación "A".



De esta manera se muestra en la figura 52, la curva granulométrica del material de la vía Puno Mañazo, el cual se halla dentro de los límites de la gradación "A" tipificado por la norma EG-2013, salvo en el extremo inferior de los tamices más pequeños que se encuentran al límite de la gradación, por tanto, este material se encontraría como apto para la capa subbase.

De la misma forma la presente curva granulométrica se ha realizado con la muestra de suelo del material de la vía Puno Mañazo en su forma natural.

4.1.3.2 Límites de Atterberg

a) Cantera Alto Puno

Tabla 34 Verificación del Índice de Plasticidad de la Cantera Alto Puno con la norma EG-2013

	CANTERA ALTO PUNO	ESP. SUB BASE (> 3000 m.s.n.m.)
Índice De Plasticidad	3.98%	4% máx.

En la tabla 34, se observa el índice de plasticidad de la muestra de suelo de la cantera de Alto Puno, el cual se encuentra dentro del rango requerido por la EG 2013. Por lo que, la muestra de suelo de la cantera se considera apto para conformar la capa subbase para el pavimento.

b) Cantera Salcedo

Tabla 35 Verificación del Índice de Plasticidad de la Cantera Salcedo con la norma EG-2013.

	CANTERA SALCEDO	ESP. SUB BASE (> 3000 m.s.n.m.)
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	9.56	4% máx.

En la tabla 35, se observa el índice de plasticidad de la muestra de suelo de la cantera de Salcedo, el cual se encuentra fuera de los límites solicitados por la EG 2013, para conformar la subbase, por lo tanto, esta cantera se podría considerar no indicado para conformar la sub base del pavimento.

4.1.3.1 Prueba de abrasión de Los Ángeles

a) Cantera Alto Puno

Tabla 36 Verificación de la proporción de desgaste de Abrasión de la Cantera Alto Puno con la EG-2013.

	CANTERA ALTO PUNO	ESP. SUB BASE (> =3000 m.s.n.m.)
% DESGASTE	49.04%	50% máx.

En la tabla 36, se presenta el porcentaje de desgaste de la cantera Alto Puno, notando que el valor está al límite de superar al máximo, por lo tanto, esta cantera es apto y se verifica con lo exigido por la EG 2013, para conformar la capa de subbase.

b) Cantera de Salcedo

No se ha realizado el ensayo de abrasión dado que al verificar sus propiedades no es apto con los requisitos mínimos para optar con algún método para la prueba de abrasión de desgates de los Ángeles.

4.1.3.2 Proctor modificado

- a) **Cantera Alto Puno.** - Observando las situaciones preliminares de la densidad máxima seca es de 1.991 gr/cc y el contenido de humedad óptimo es de 11.50%.
- b) **Cantera Salcedo.** - Observando las situaciones preliminares de la densidad máxima seca es de 2.05 gr/cc y el contenido de humedad óptimo es de 8.90%.
- c) **Material de la subbase de la vía Puno Mañazo.** - Observando las situaciones preliminares para la primera calicata ubicado en la vía descrita KM. 08+750 la densidad máxima seca es de 2.00 gr/cc y el contenido de humedad óptimo es de 11.52% y para la segunda calicata ubicada en el KM. 09+300 la densidad máxima seca es de 1.986 gr/cc y el contenido de humedad óptimo es de 11.89%.



4.1.3.3 Valor relativo de soporte (CBR)

a) Cantera Alto Puno.

Tabla 37 Verificación del Valor Relativo de Soporte de la Cantera Alto Puno (suelo natural) con la EG 2013.

	CANTERA ALTO PUNO	ESP. SUB BASE (≥ 3000 m.s.n.m.)
CBR al 100% de la Densidad Máxima Seca	30%	40% min.

En la tabla 37, presentamos el CBR de la cantera de Alto Puno en su forma natural, el valor determinado se encuentra fuera del límite del rango requerido por la EG 2013, para conformar la capa subbase, sin embargo, la cantera se considerará apta después de realizar el mejoramiento con el agente estabilizante cal, a fin de cubrir la parte estructural del pavimento a nivel de subbase, por lo que debemos mejorar el valor de soporte relativo CBR, también tener presente que las propiedades obran en conjunto a fin de conformar la subbase con las demás capas, por lo que si una de las propiedades antes descritas no cumplen con las solicitudes mínimas de la EG 2013 (Límites Atterberg, la granulometría, abrasión), teniendo este anote la cantera inicialmente se considerara no apta para cubrir la capa de subbase.

b) Cantera Salcedo.

Tabla 38 Verificación del Valor Relativo de Soporte de la Cantera Salcedo con la EG2013.

	CANTERA ALTO PUNO	ESP. SUB BASE (≥ 3000 m.s.n.m.)
CBR al 100% de la Densidad Máxima Seca	7%	40% min.



En la tabla 38, presenta el valor del CBR de la cantera de Salcedo es menor al mínimo de la cuantía requerida por la EG-2013, lo cual no es apta para conformar la capa de subbase, por lo que se realizará el mejoramiento de la cantera con el agente estabilizante al óptimo porcentaje de cal, mismo que será determinado con la cantera de Alto Puno.

c) Material de la subbase de la vía Puno Mañazo. –

Tabla 39 Verificación del Valor Relativo de Soporte del Material de la subbase de la vía Puno Mañazo con la EG 2013.

	CALICATA KM. 08+750	ESP. SUB BASE (≥ 3000 m.s.n.m.)
CBR al 100% de la Densidad Máxima Seca	32%	40% min.

Tabla 40 Verificación del Valor Relativo de Soporte del Material de la subbase de la vía Puno Mañazo con la EG 2013.

	CALICATA KM. 09+300	ESP. SUB BASE (≥ 3000 m.s.n.m.)
CBR al 100% de la Densidad Máxima Seca	28%	40% min.

En la tabla 39 y 40, presentamos el CBR del material extraído de la vía Puno Mañazo kilómetros 08+750 y 09+300, obtenida de la berma de la carretera descrita, los valores obtenidos después de haber realizado los ensayos, se encuentran fuera del límite de las condiciones solicitadas por la EG 2013, para componer la capa subbase, por lo tanto el material extraído requiere algún tipo de tratamiento para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas con el algún agente estabilizante, considerándose no apta preliminarmente para cubrir la parte estructural del pavimento a nivel de subbase, por lo que debemos mejorar el valor de soporte relativo CBR, también tener presente que las propiedades obran en conjunto a fin de conformar la subbase con las demás capas, por lo que si una de las propiedades antes descritas no cumplen con las solicitudes mínimas de

la EG 2013 (Límites Atterberg, la granulometría, abrasión), teniendo este anote del material de la vía inicialmente se considerara no apta para cubrir la capa de subbase.

4.2 DISCUSIÓN

4.2.1 Estabilización Del Suelo De Las Canteras Con Cal.

4.2.2 Ensayo De Proctor Modificado

4.2.2.1 Resultado De La Cantera De Alto Puno

4.2.2.1.1 Densidad Máxima Seca

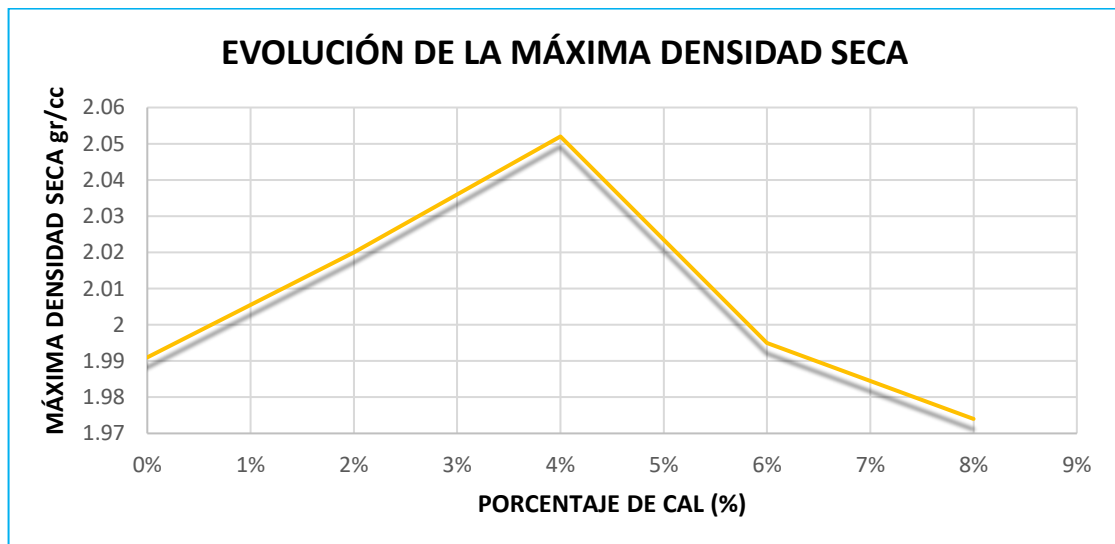
Tabla 41 Densidad Máxima Seca del material de Cantera Alto Puno con adición de cal.

CANTERA ALTO PUNO	CAL (OXIDO DE CALCIO)				
	0%	2%	4%	6%	8%
Densidad Máxima Seca (gr/cm ³)	1.991	2.020	2.052	1.995	1.974

Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.

Figura 53

Densidad Máxima Seca del material de Cantera Alto Puno con adición de Cal.



En la figura 53, se exhibe un declive gradual de la densidad máxima seca desde 1.991 gr/cm³, 2.020 gr/cm³, 2.052 gr/cm³, 1.995 gr/cm³ y 1.974 gr/cc al 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, con la adición de cal respectivamente.

4.2.2.1.2 Contenido de humedad óptimo (CHO)

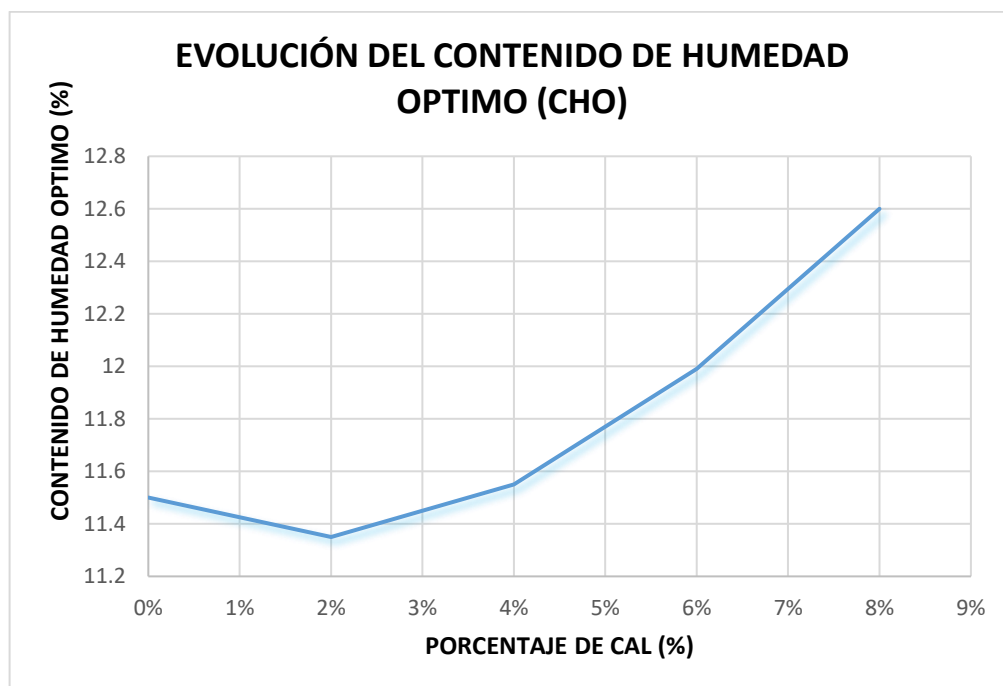
Tabla 42 *Contenido de Humedad Óptimo(CHO) del material de Cantera Alto Puno con la adición de Cal.*

CANTERA ALTO PUNO	CAL (OXIDO DE CALCIO)				
	0%	2%	4%	6%	8%
Contenido de humedad óptimo (CHO)%	11.50	11.35	11.55	11.99	12.60

Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.

Figura 54

Contenido de Humedad Óptimo(CHO) del material de Cantera Alto Puno con el aditamento de Cal.

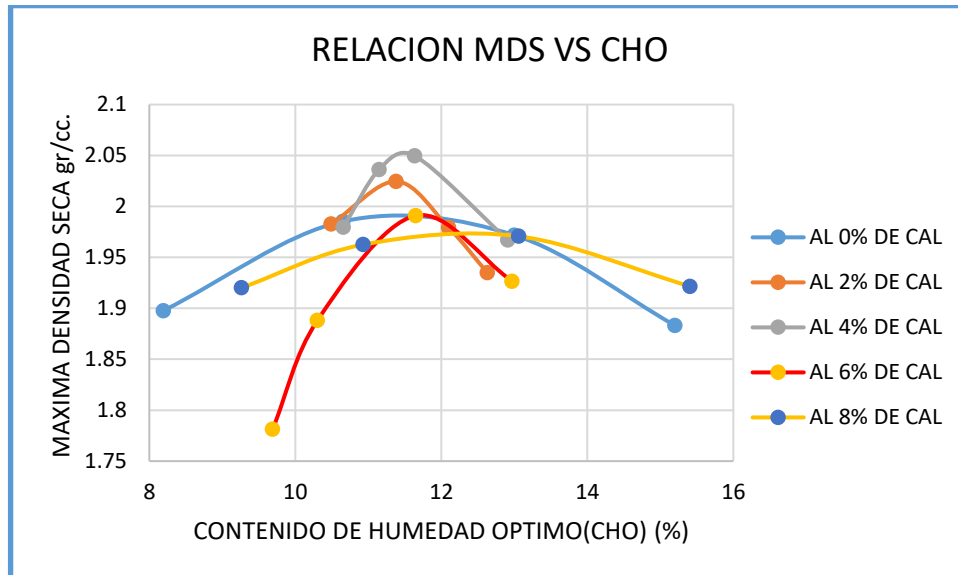


En la figura 54, presenta un progreso sucesivo del contenido de humedad óptimo(CHO) desde 11.50 %, 11.35 %, 11.55 %, 11.99 % y 12.60 % al 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, con la adición de cal respectivamente.

4.2.2.2 ANÁLISIS DEL RESULTADOS DE LA CANTERA DE ALTO PUNO

Figura 55

Resumen de las curvas de compactación de la Cantera de Alto Puno.



En la figura 55, presenta los resúmenes de las curvas de compactación con la adición de cal. Asimismo, se puede observar en la gráfica presente, el decremento progresivo a partir de la curva al 4% de cal con respecto a la densidad máxima seca, este descenso sucede ocurre por la adición de cal y la reacción química de la muestra de suelo causando un cambio en el suelo de manera a efecto cementante.

De la misma forma en la figura 55 se observa, como el contenido de humedad óptimo va en ascenso, este efecto sucede debido a la adición del óxido de calcio con la muestra de suelo resultando una reacción química entre el suelo y la cal, también se puede notar que la cal absorbe y necesita más agua.

Por su naturaleza la cal absorbe agua mediante una reacción llamada exotérmica (genera calor), de esta manera reduce rápidamente la humedad del suelo por hidratación y evaporación.

4.2.2.3 Resultado De La Cantera De Salcedo

4.2.2.3.1 Densidad Máxima Seca

Esta cantera de Salcedo se tomó como complemento del presente proyecto de investigación a fin de realizar las comparaciones y optar en aplicar el contenido de cal al 4%, a fin determinar si para la presente cantera también se obtiene un CBR, mayor a la cantera de Alto Puno.

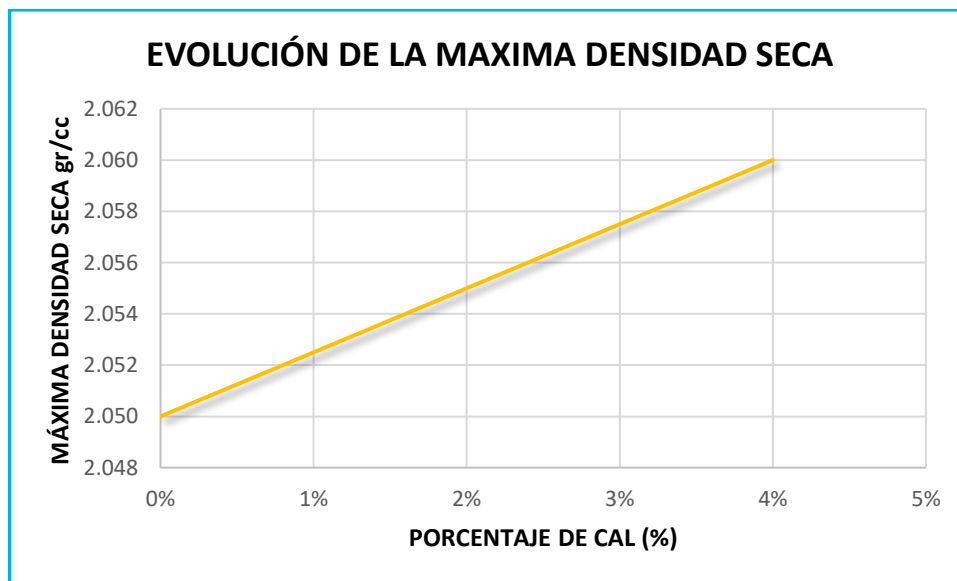
Tabla 43 Densidad Máxima Seca del material de Cantera Salcedo con adición de cal

CANTERA SALCEDO	CAL (OXIDO DE CALCIO)	
	0%	4%
Densidad Máxima Seca (gr/cc)	2.050	2.060

Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.

Figura 56

Evolución de Máxima Densidad Seca de la Cantera de Salcedo.



En la figura 56, se exhibe la evolución de la densidad máxima seca(DMS) desde su forma natural hasta la añadidura de cal al suelo, notando como va en ascenso la densidad máxima seca respecto al porcentaje de cal.

4.2.2.3.2 Contenido De Humedad Optimo(CHO)

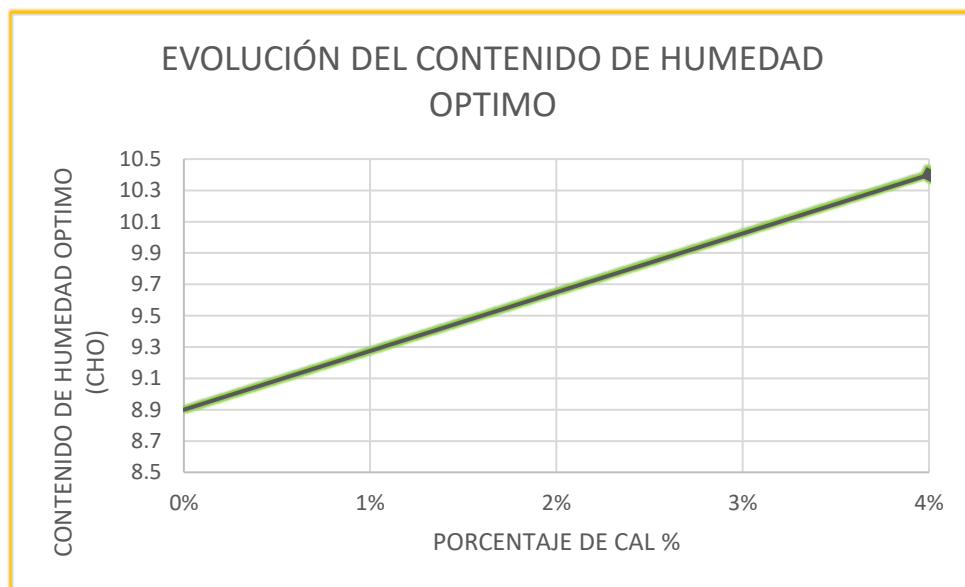
Tabla 44 *Contenido de Humedad Óptimo(CHO) para la mezcla del material de la Cantera Salcedo con la adición de Cal y sin Cal.*

CANTERA SALCEDO	CAL (OXIDO DE CALCIO)	
	0%	4%
Contenido De Humedad Optimo	8.90%	10.40%

Nota: Adaptada del ensayo de Proctor modificado.

Figura 57

Contenido de Humedad Óptimo(CHO) para la mezcla del material de la Cantera Salcedo con y sin la adición de cal.

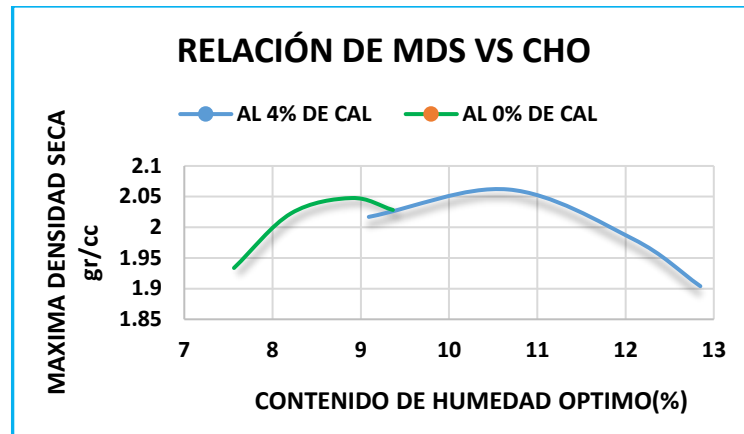


De la misma forma en la figura 57, se exhibe como el contenido de humedad optimo(CHO) va en ascenso, este efecto sucede debido a la adición del óxido de calcio al suelo de la cantera de Salcedo, resultando una reacción química entre el suelo y la cal, también se puede notar que la cal absorbe y necesita más agua. Por su naturaleza la cal absorbe agua mediante una reacción llamada exotérmica (genera calor), de esta manera reduce rápidamente la humedad del suelo por hidratación y evaporación.

4.2.2.4 Análisis De Resultados De La Cantera De Salcedo

Figura 58

Resúmenes de las Curvas de Compactación Cantera Salcedo.



En la figura 58, se exhibe los resúmenes de las curvas de compactación con y sin la adición de Cal, observándose un mínimo crecimiento de la densidad máxima seca, sin embargo, el ascenso del contenido de humedad optimo va en crecimiento.

4.2.3 Ensayo Del Valor Relativo De Soporte (CBR)

4.2.3.1 Resultado De La Cantera De Alto Puno

Tabla 45 Valor Relativo de Soporte (CBR) del material de Cantera Alto Puno con y sin adición Cal al 100% de la Densidad Máxima Seca.

CANTERA ALTO PUNO		PORCENTAJE DE CAL (%)				
PROPIEDAD	NUMERO DE GOLPES	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %
CBR (%)	12	20	28	58	39	31
	25	26	52	67	66	52
	56	30	73	104	80	71

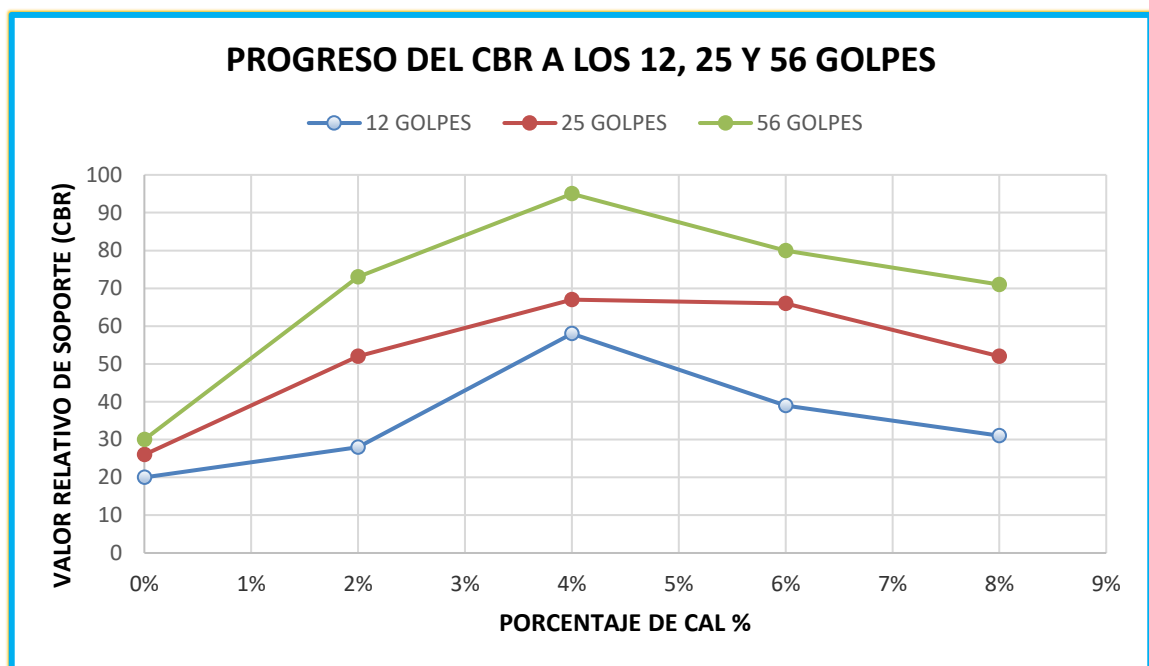
Nota: Adaptada del ensayo del valor relativo de soporte CBR.

La presente tabla 45, se exhibe la muestra de suelo para el numero de golpes 12, 25 y 56 con respecto a la compactación en un crecimiento progresivo del valor de (CBR), desde el 0% de cal hasta el 4% de Cal siendo este valor ultimo el máximo CBR respecto

a las demás proporciones de Cal, luego comienza a descender el Valor Relativo De Soporte (CBR) desde el 4%, 6% y 8%, tal como se muestra en la tabla respectiva.

Figura 59

Valor Relativo de Soporte (CBR) a los 12, 25 y 56 golpes al 100% de la Densidad Máxima Seca para la mezcla del material de la cantera Alto Puno con la adición de cal y sin cal.



En la figura 59, se exhibe el progreso del CBR, con las diferentes proporciones de Cal respecto al número de golpes 12, 25 y 56 golpes de compactación observando el crecimiento progresivo desde 0% de Cal hasta el 4% de Cal y el descenso posterior desde 4 % hasta 8% con el aditamento de cal, por lo que se puede deducir que la suma de cal hasta el 4% hace que aumente la resistencia del suelo efectivamente y a la vez se nota que ocurre una reacción química lo cual hace que se estabilice el suelo.



Tabla 46 *Expansión de la cantera de Alto Puno expresado en % con respecto a 12, 25 y 56 golpes con 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de Cal.*

CANTERA ALTO PUNO		CAL (%)				
PROPIEDAD	NUMERO DE GOLPES	0%	2%	4%	6%	8%
EXPANSIÓN (%)	12	0.011%	0.010%	-0.030%	0.021%	-0.040%
	25	0.003%	0.010%	0.010%	-0.028%	-0.040%
	56	0.001%	0.020%	-0.010%	0.003%	-0.040%

En la presente tabla 44, se muestran las expansiones para 12 golpes de compactación notando descensos y ascensos mínimos de 0.011%, 0.01%, -0.03%, 0.021 % y -0.04% con 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de cal correspondientemente.

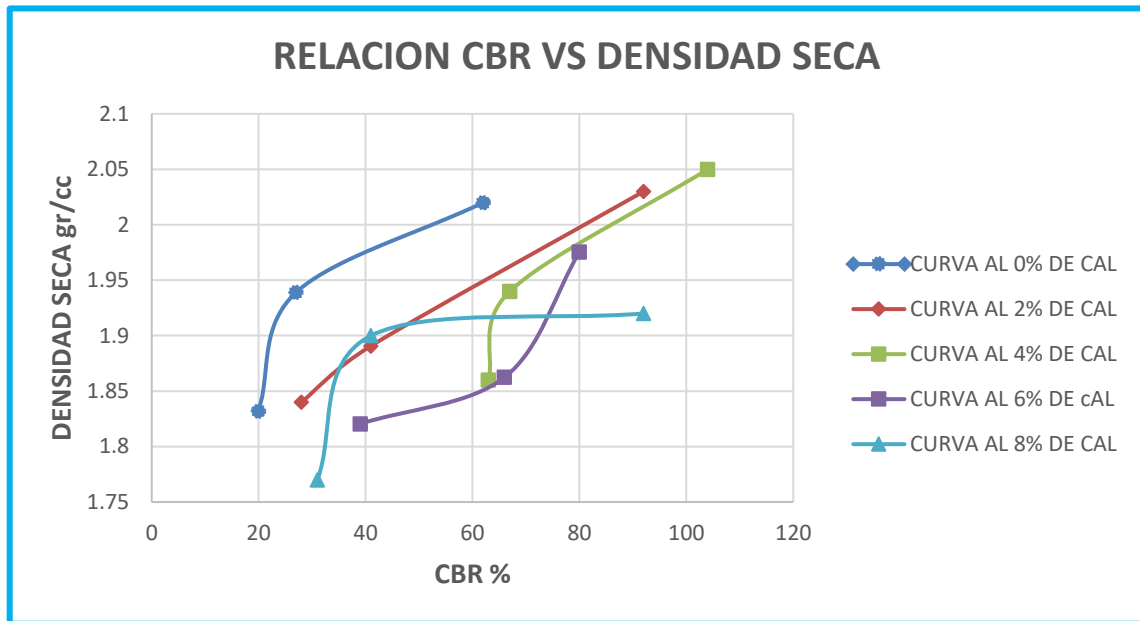
Para el N° de golpes de 25 con respecto a su compactación, de igual manera se observa un descenso mínimo de expansión 0.003%, 0.010%, 0.010%, -0.028% y -0.040% con 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de cal correspondientemente.

Finalmente, para el N° de golpes de 56 con respecto a su compactación, se nota un descenso mínimo de expansión 0.001%, 0.020%, -0.010%, -0.003 % y -0.04% con 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de cal correspondientemente. Por último, la adición de Cal a la cantera de Alto Puno produce expansiones mínimas.

4.2.3.2 Análisis De Resultado Para La Cantera De Alto Puno.

Figura 60

Resúmenes de las Curvas de Compactación del Valor Relativo de Soporte(CBR) y Densidad Seca de la Cantera Alto Puno.



De la figura 60, se presenta el resumen de las curvas de Densidad Seca versus el valor relativo de soporte, con la suma de Cal a la cantera de Alto Puno.

Por lo que del presente ensayo se puede deducir que la compactación a los 12, 25 y 56 golpes de compactación, hace que la muestra de suelo aumento progresivamente su resistencia del suelo.

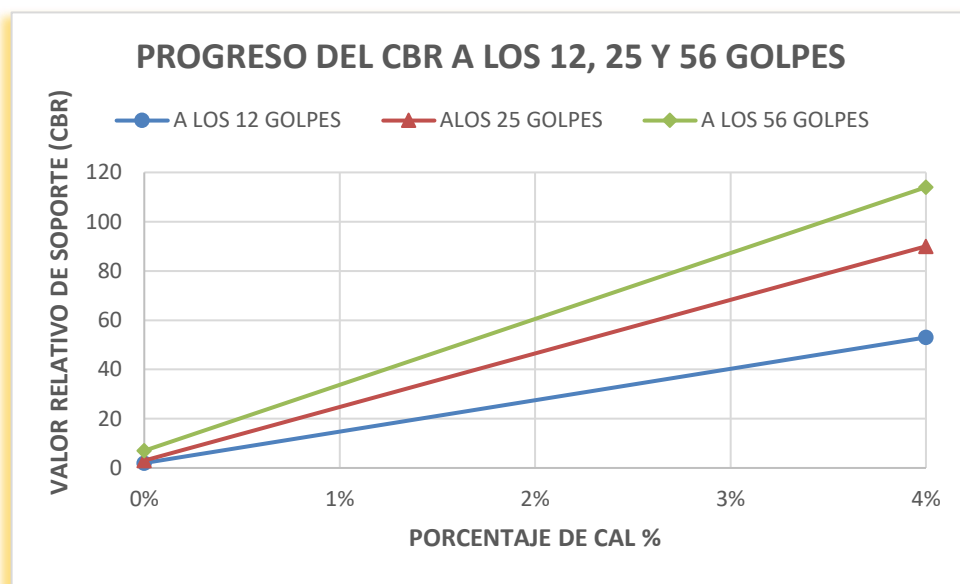
4.2.3.3 Resultados De La Cantera De Salcedo

Tabla 47 Valor Relativo de Soporte(CBR) del material de Cantera- Salcedo sin cal y con la adición de cal al 100% de la Densidad Máxima Seca.

CANTERA SALCEDO		PORCENTAJE DE CAL	
PROPIEDAD	NUMERO DE GOLPES	0%	4%
CBR (%)	12	2	53
	25	3	90
	56	7	114

Figura 61

Valor Relativo de Soporte(CBR) a los 12, 25 y 56 golpes al 100% de la Densidad Máxima Seca para la mezcla del material de la Cantera de Salcedo con y sin la adición de Cal.



En la tabla 61, se presenta el progreso del valor del CBR a los (12, 25 y 56) golpes de compactación, observando un crecimiento gradual respecto al valor relativo de soporte (CBR) con respecto a la añadidura de Cal 0 % y 4%, notando que a los 56 golpes a los 56 golpes de compactación determinaremos la densidad máxima seca de la muestra de suelo de la cantera de Salcedo, notando la variación del CBR de 7% y 114% al 0% y 4%



de Cal respectivamente. Asimismo, se deduce que el material de cantera de Salcedo se estabiliza y mejora favorablemente respecto a la resistencia de suelo, teniendo presente que esto ocurre a la adición de cal al 4%.

Tabla 48 *Expansión de la cantera de Salcedo expresado en % con respecto a 12, 25 y 56 golpes para 0% y 4% de Cal.*

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	Expansión	
				mm	%		mm	%		mm	%
27/09/2022	13:00pm	0	15.165	0.00	0.00	2.325	0.00	0.00	14.435	0.00	0.00
28/09/2022	13:05pm	18h	15.167	0.00	0.00	2.326	0.00	0.00	14.461	0.03	0.02
29/09/2022	13:02pm	62h	15.169	0.00	0.00	2.345	0.02	0.02	14.472	0.04	0.03
30/09/2022	13:00pm	88h	15.172	0.01	0.01	2.357	0.03	0.03	14.485	0.05	0.04

La tabla 46, se presenta las expansiones ensayadas para la Cantera de Salcedo a los doce (12) golpes de compactación notando un acrecentamiento expansivo pequeñísimo de: 0.00% y 0.04% al 0%, y 4% respectivamente.

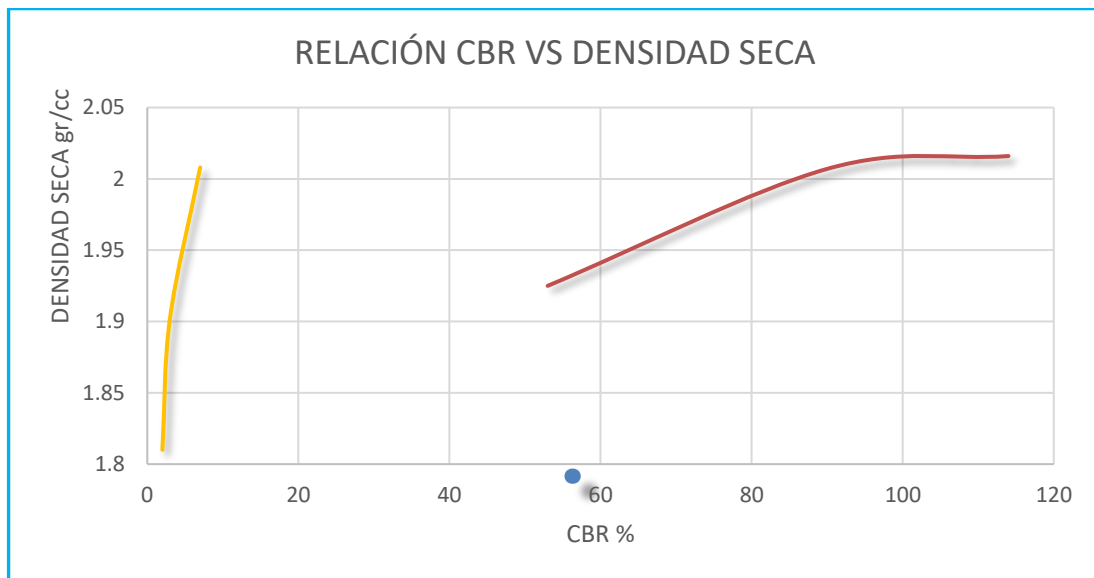
A los veinticinco (25) golpes de compactación notando un acrecentamiento expansivo pequeño de: 0.00% y 0.03% al 0%, y 4% respectivamente.

Finalmente, a los cincuenta seis (56) golpes de compactación notando un acrecentamiento expansivo pequeño de: 0.00% y 0.01% al 0%, y 4% respectivamente. Donde se puede deducir que al agregar la Cal a la muestra de suelo ocurre un mínimo crecimiento gradual a la expansión.

4.2.3.4 Análisis De Resultados De La Cantera De Salcedo

Figura 62

Síntesis de las curvas de compactación del Valor Relativo de Soporte(CBR) VS Densidad Seca de la Cantera Salcedo.



En la figura 62, se presenta la síntesis de las curvas del valor relativo de soporte con respecto a la densidad seca, sin y con la añadidura de cal respectivamente.

Al respecto podemos deducir que después de realizar el ensayo presente para la cantera de Salcedo para los (12, 25 y 56) golpes de compactación se nota un progreso notable del CBR, por lo que se resume que la adición de cal para este suelo estabiliza y mejora su resistencia mecánica.

4.2.3.5 Análisis De Resultados Del Ensayo Penetrómetro Dinámico

Ligero (DPL).

Tabla 49 Datos del ensayo DPL in situ.

PROFUNDIDAD (cm)	PUNTO NRO. 1 PUNTO NRO. 2 PUNTO NRO. 3		
	NRO. DE GOLPES (Ndpl)	NRO. DE GOLPES (Ndpl)	NRO. DE GOLPES (Ndpl)
0.00	0	0	0
10.00	65	75	58
20.00	75	69	85
30.00	58	84	57
40.00	75	65	50
50.00	80	55	25
60.00		50	32
70.00		30	32
80.00		50	20
90.00		48	22
100.00		23	42
110.00		22	77
120.00		34	66
130.00		50	48
140.00		55	41
150.00		49	47
160.00		50	50
170.00		61	66
180.00		69	55

Nota. Registro del ensayo DPL in situ.

En la tabla 47, se presenta los datos del ensayo DPL in situ a nivel de Subrasante, realizado en el tramo KM 08+000 al 10+000 de la carretera Puno – Mañazo, procedimiento que se ejecutó en tres puntos diferentes del tramo especificado, prueba realizada con la finalidad de determinar el CBR in situ.

Como se observa en la Tabla 49, en el Punto Nro. 1 se observa los valores por encima de 50 golpes, por lo que se detuvo el ensayo al tener en consideración que el suelo es muy denso (contacto con una roca) y el equipo comienza a rebotar.

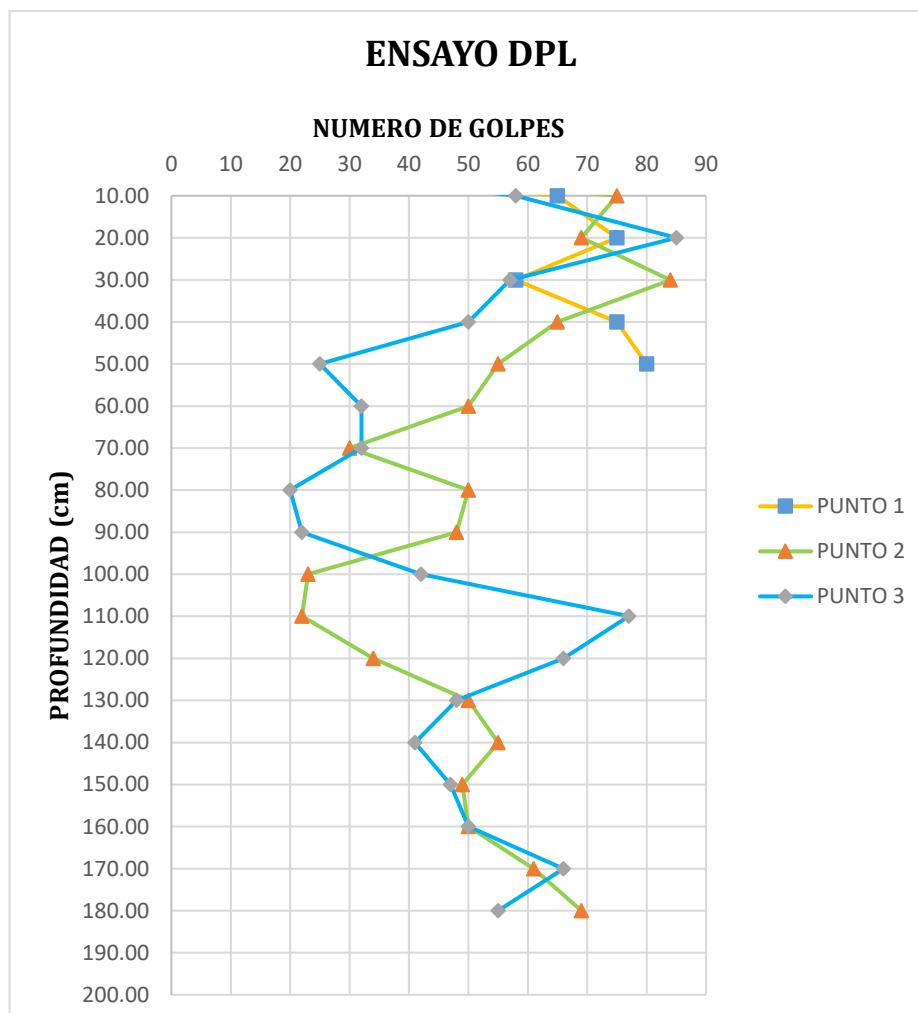
En el Punto Nro. 2, se observa a una profundidad de 50 cm., valores por encima de 50 golpes, teniendo hasta eso punto un suelo muy denso, posteriormente valores

admisibles para el presente ensayo en la parte final nuevamente se encuentra con un suelo muy denso.

En el Punto Nro. 3, se observa a una profundidad de 40 cm., valores por encima de 50 golpes, teniendo hasta eso punto un suelo muy denso, posteriormente valores admisibles para el presente ensayo en la parte final nuevamente se encuentra con un suelo muy denso.

Figura 63

Resumen del ensayo DPL profundidad VS número de golpes.



Nota. Datos del ensayo de DPL in situ.



Tabla 50 Resultados del ensayo DPL in situ.

Punto 1	Punto 2	Punto 3
DPL (mm/golpes)	DPL (mm/golpes)	DPL (mm/golpes)
1.9231	1.6667	2.1552
3.3333	3.6232	2.9412
6.4655	4.4643	6.5789
6.6667	7.6923	10.0000
7.8125	11.3636	25.0000
	15.0000	23.4375
	29.1667	27.3438
	20.0000	50.0000
	23.4375	51.1364
	54.3478	29.7619
	62.5000	17.8571
	44.1176	22.7273
	32.5000	33.8542
	31.8182	42.6829
	38.2653	39.8936
	40.0000	40.0000
	34.8361	32.1970
	32.6087	40.9091

Nota. Adaptada del ensayo DPL in situ.

En la tabla 50, se expresan los resultados determinados del ensayo de Penetrometro dinámico ligero, observándose las unidades del ensayo DPL en milímetros por el número de golpes, además se observa la variación que existe en las diferentes profundidades de acuerdo al número de golpes, en los distintos puntos del ensayo.

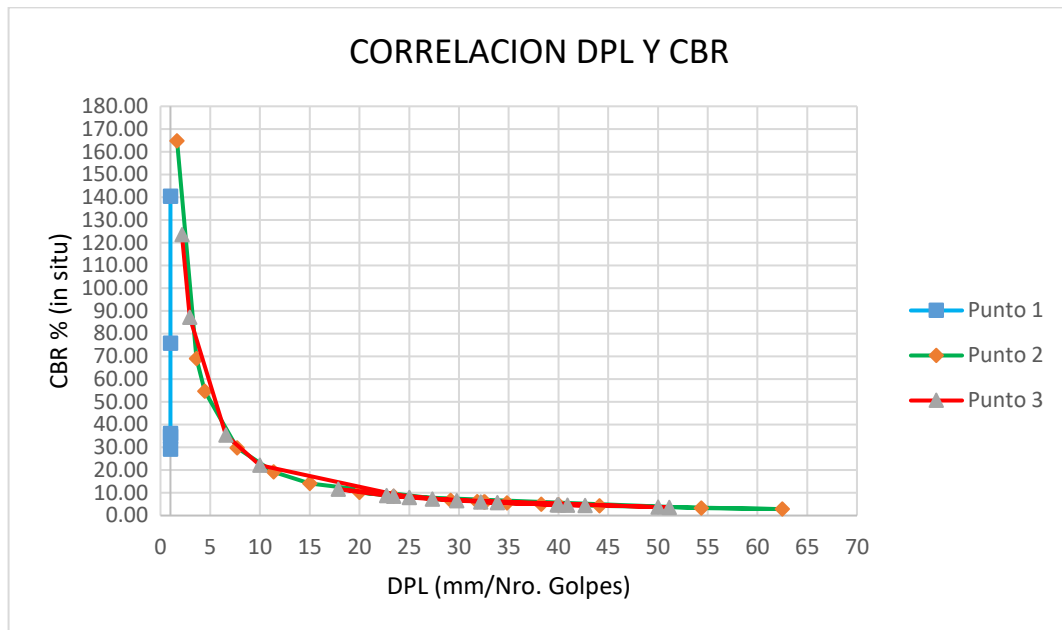
Tabla 51 Resumen de correlación DPL y CBR.

CBR 1 (%)	CBR 2 (%)	CBR 3 (%)
PTO. 1	PTO. 2	PTO. 3
140.38	164.78	123.56
75.82	69.06	87.22
36.10	54.66	35.40
34.88	29.72	22.15
29.21	19.20	7.94
	14.07	8.53
	6.68	7.18
	10.19	3.65
	8.53	3.56
	3.33	6.53
	2.84	11.57
	4.20	8.83
	5.92	5.65
	6.06	4.36
	4.93	4.70
	4.69	4.69
	5.47	5.98
	5.89	4.57

En la tabla 51, se exhibe la síntesis de los valores obtenidos del CBR in situ, teniendo en cuenta la primera fórmula mostrada en la tabla 21 del autor Van Vuren (1986)., con la cual se ha determinado el valor relativo de soporte (CBR) a diferentes profundidades, observándose que a una profundidad de 30 centímetros en los puntos 1, 2 y 3 son considerables los valores del CBR para el estrato de subbase, cumplen con los precisiones mínimas exigidos por la MTC, asimismo se observa que a mayor profundidad el valor de CBR va reduciendo su valor progresivamente. Además, debemos referir que en el punto 1 el valor de CBR es 29.21% a una profundidad de 50 cm., en dicha profundidad el martillo comenzó rebotar por lo que se detuvo el ensayo a fin de salvaguardar el equipo, por lo se prevería que en dicho punto 1, la existencia de una zona rocosa o material granular.

Figura 64

Curva de resumen de correlación DPL y CBR.



En la figura 64, se exhibe la correlación de DPL y CBR (%) en los puntos 1, 2 y 3 de prueba con el equipo DPL, observándose a mayor profundidad el valor relativo de soporte (CBR) va disminuyendo de forma decreciente.

4.2.4 Hipótesis estadística

Después de calcular la magnitud del coeficiente de correlación, se debe observar si la magnitud calculada con las variables representados por X e Y están relacionados o simplemente coincidieron de casualidad, en otros términos, debemos interpretar el nivel de significancia.

Tabla 52 *Tipificación de hipótesis*

Tipificación De Hipótesis	
Hipótesis nula H_0	Hipótesis alternativa H_1 .
La que se contrasta	Es la negación de H_0 .
Los datos pueden rechazarla	Los datos pueden mostrar evidencia favorable.
No debe ser contradicho sin una buena razón	No debe ser aprobada sin una gran evidencia favorable.

Nota. Adaptada del texto de Prueba de Hipótesis I (LEON, 2013, pág. 10)

$$H_0 : p = 0.5 (=)$$

$$H_1 : p \neq, 0.5 (\neq, >, <)$$

4.2.5 Prueba De Hipótesis Para La Correlación

1. Hipótesis estadística

$$H_0 : p = p_0$$

$$H_a : p \neq p_0$$

Dónde: H_0 =Deserción de correspondencia (correlación) entre las variables

H_a =Presencia de correspondencia (correlación) entre las variables de manera directa.

2. Optar con el nivel de significación:

α , se asume ($\alpha = 0.01$, $\alpha = 0.05$, $\alpha = 0.10$).

3. Cómputo del valor experimental.

r^2 , gl, t, p: si r^2 = coeficiente de determinación.



Determinación de los parámetros

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

Además

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

Donde:

4. Si: $p > \alpha$: admitimos H_0 : y denegamos la H_a

Si: $p < \alpha$ denegamos H_0 : y admitimos H_a

5. Finalmente, se debe efectuar la definición de acuerdo al ítem 4 y culminar en concordancia a la hipótesis planteada.

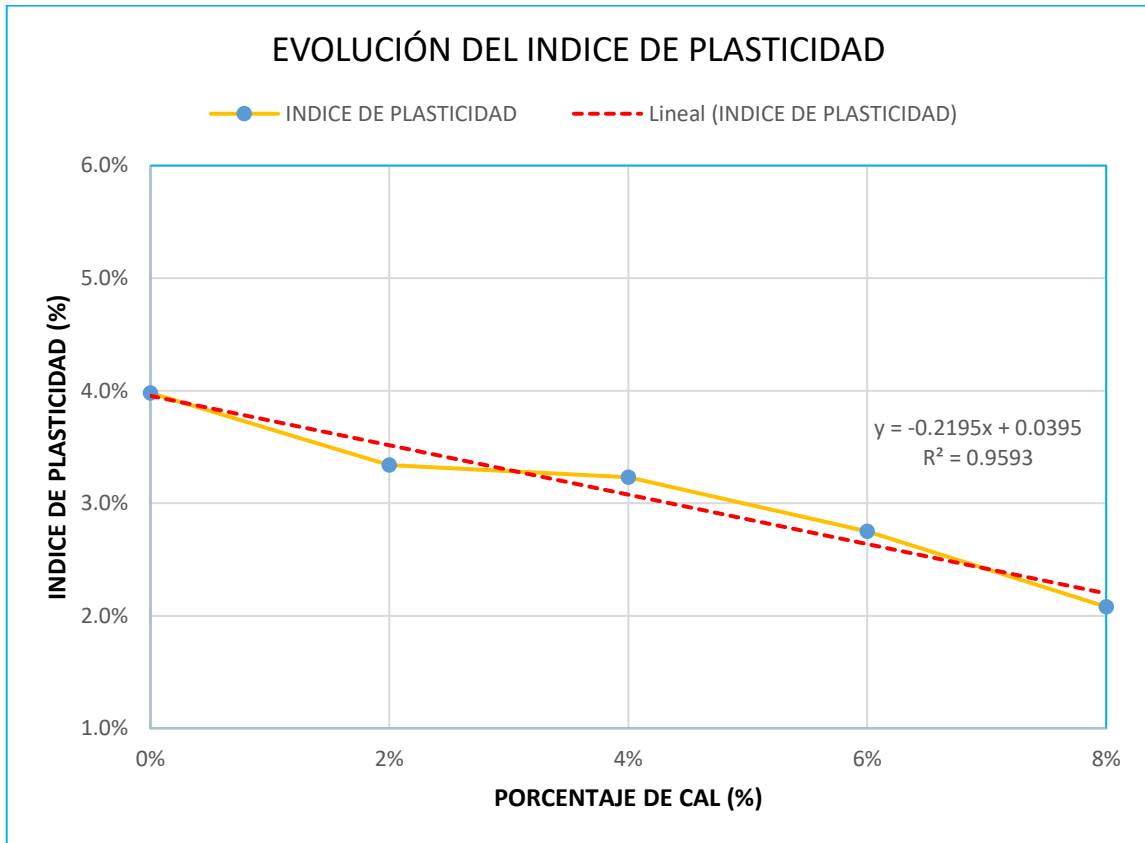
Por lo tanto, se desarrollará con los datos y resultados conseguidos en cada prueba y ensayo, teniendo preliminarmente la conclusión es la adición de cal para la cantera de Alto Puno con sus diversos porcentajes de cal y para la Cantera de Salcedo solo al 0 % y 4% de Cal. Por lo que se realizara las correlaciones de las canteras antes descritas.

4.2.6 Correlaciones Para La Cantera De Alto Puno

4.2.6.1 Correlación Para El Índice De Plasticidad

Figura 65

Correlación del Índice de Plasticidad y Cal (%) adicionado a la muestra de suelo.

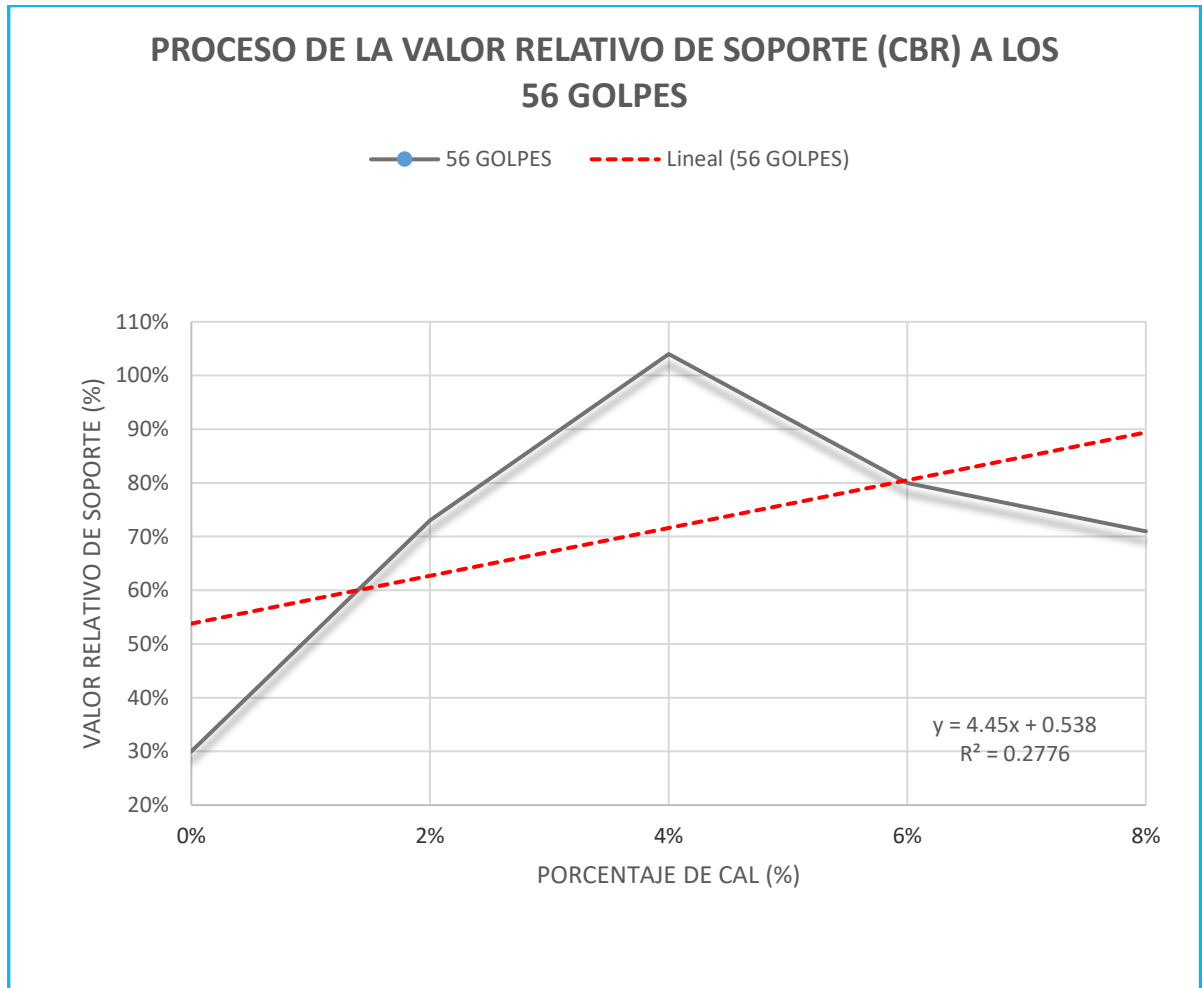


Nota: Correlación índice de plasticidad con la añadidura de cal.

4.2.6.2 Correlación Del Valor De Relativo De Soporte (CBR).

Figura 66

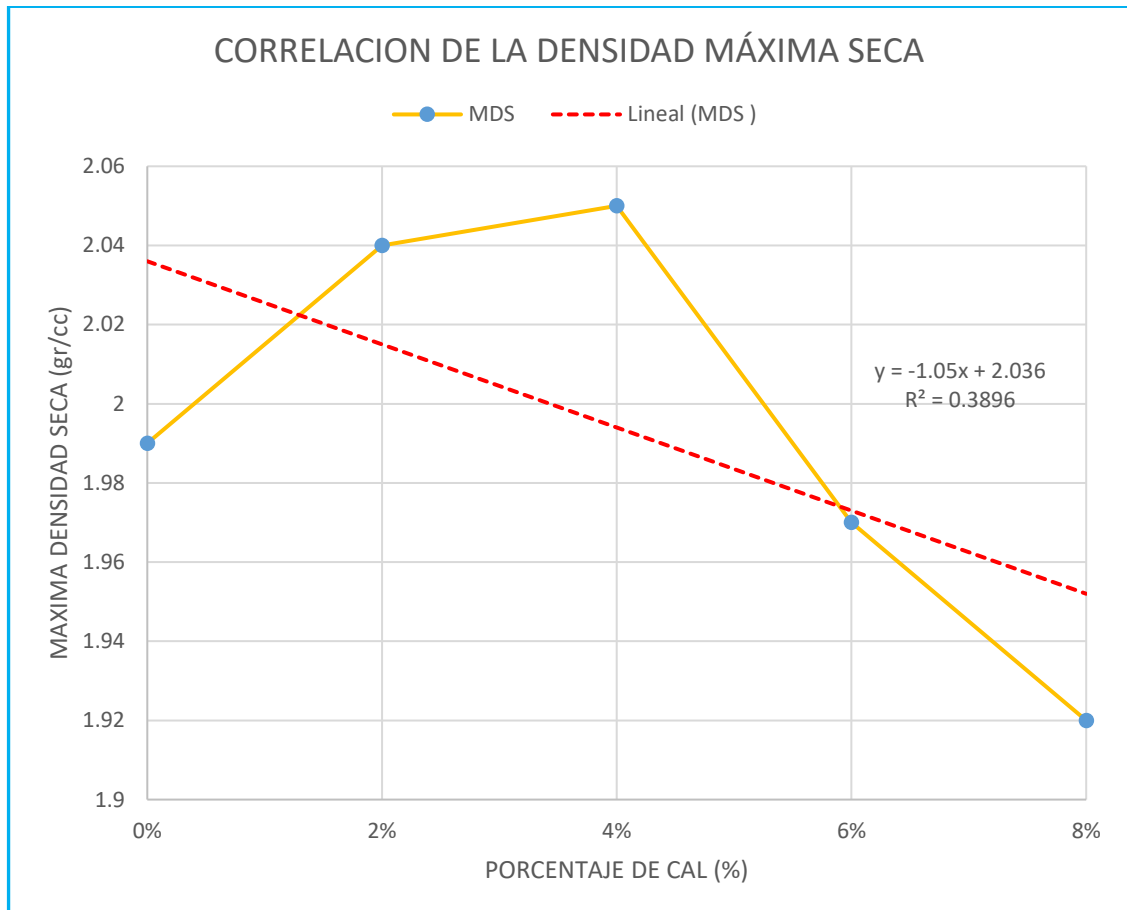
Correlación del Valor Relativo de Soporte (CBR) a los 56 golpes de compactación de la Máxima Densidad Seca al (100%), para el suelo natural y el suelo estabilizado con Cal.



Nota: Correlación del valor relativo de soporte con la añadidura de cal

Figura 67

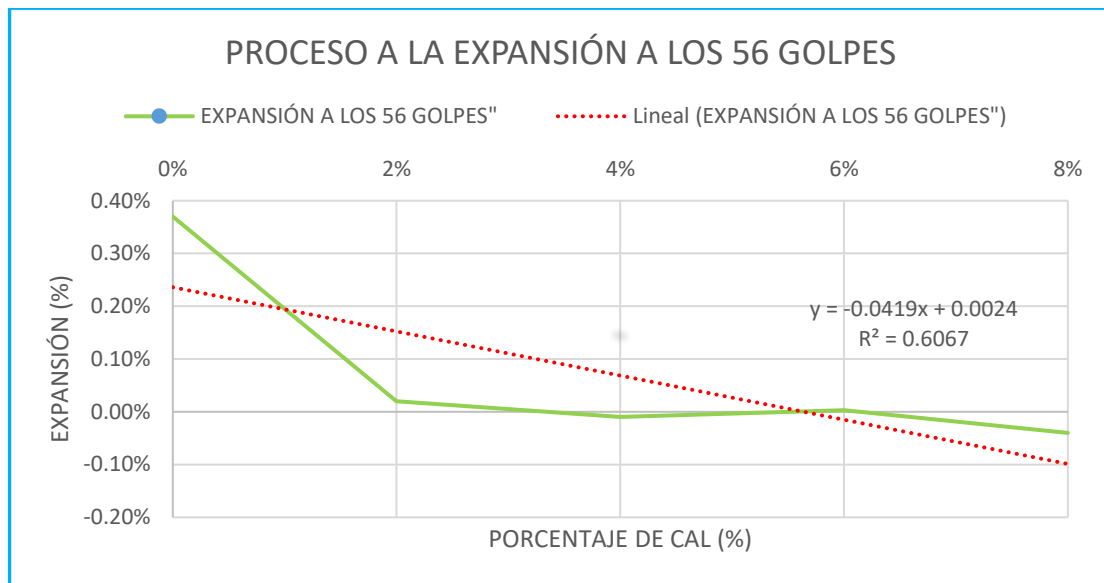
Correlación de la Densidad Máxima Seca para la mezcla del material natural Cantera Alto Puno con porcentaje de Cal agregado al suelo.



Nota: Correlación del valor de la densidad máxima seca con la adición de cal.

Figura 68

Correlación de la Expansión a los 56 golpes de compactación con respecto al porcentaje de Cal agregado al suelo.



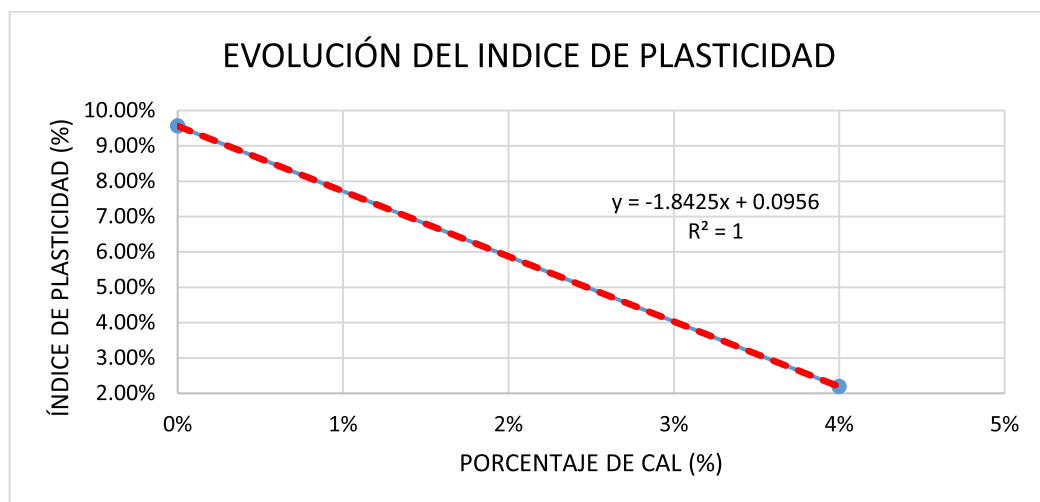
Nota: Proceso a la expansión a los 56 golpes.

4.2.7 Correlaciones Para La Cantera De Salcedo

4.2.7.1 Correlación para el Índice de Plasticidad

Figura 69

Correlación del Índice de Plasticidad y el 4% de Cal agregado a la muestra de suelo.

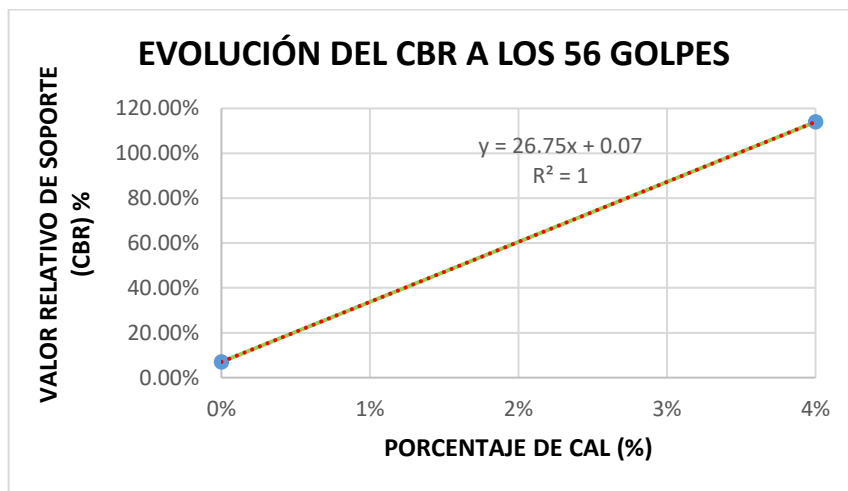


Nota: Correlación del valor del índice de plasticidad con la añadidura de cal del 0% al 4%.

4.2.7.1 Correlación Para El Valor Relativo De Soporte (CBR).

Figura 70

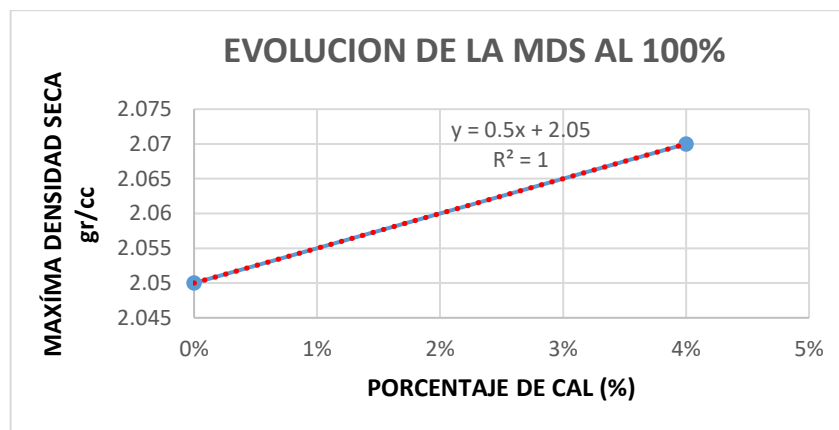
Correlación del Valor Relativo de Soporte (CBR) a los 56 golpes de compactación de la Densidad Máxima Seca al (100%), para el suelo natural y el suelo estabilizado con 4% de Cal.



4.2.7.2 Correlación De La Máxima Densidad Seca

Figura 71

Correlación de la Densidad Máxima Seca para la mezcla del suelo natural con la adición del 4% de Cal.



Nota: Adaptada de los resultados del ensayo Proctor modificado.

4.2.8 Prueba De Hipótesis Para La Cantera De Alto Puno

4.2.8.1 Variable Índice De Plasticidad

El coeficiente “r” de correlación de Pearson está determinado por la expresión siguiente:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \sum_{i=1}^n X * \sum_{i=1}^n Y}{\sqrt{n * \sum_{i=1}^n X^2 - (\sum_{i=1}^n X)^2 * \sqrt{n \sum_{i=1}^n Y^2 - (\sum_{i=1}^n Y)^2}} = -0.9794$$

Se determinó una correlación negativa muy alta, por lo tanto, se observa que existe una correspondencia directa entre las variables el índice de plasticidad y el % de cal añadido al suelo natural.

Hallamos los datos empíricos: r^2 , gl, t y p.

$$r^2 = 0.9593$$

$$gl = 4$$

$$t = 0.638$$

$$p = 0.279$$

Se observa que el experimento tiene admisible ajuste de 95.93% de la diferenciación del índice de plasticidad con la adición de cal al suelo natural. Esto debido a que el índice de plasticidad en el suelo natural tiene índice de plasticidad de 3.98%.

Prueba de hipótesis para $p \neq 0$,

Tenemos la hipótesis estadística:

$$H_o: p = p_o$$



$$H_a: p \neq p_o$$

H_o : La cal como agente estabilizante de suelo no mejora las propiedades mecánicas, reduciendo el índice de plasticidad del suelo, no tomándose en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio.

H_a = La cal como agente estabilizante de suelo mejora las propiedades mecánicas, reduciendo el índice de plasticidad del suelo, tomándose en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio.

Tomándose en consideración lo siguiente:

H_o : Hipótesis nula

H_a : Hipótesis alterna

Considerando el nivel significancia: $\alpha = 0.05$ o 5%

La norma de disposición es: Si el “ p ” es menor o igual a α ($p \leq \alpha$), se rechaza la hipótesis nula H_o y se opta en aceptar la hipótesis alterna H_a .

$$\begin{aligned} p &\geq \alpha \\ 0.279 &\geq 0.05 \end{aligned}$$

Se concluye de lo expresado $p \geq \alpha$, existiendo suficientes argumentos para aseverar que $p \neq 0$, apuntando que el coeficiente de correlación es distinto de cero. Por lo que con este resultado demostramos y corroboramos la correlación de las dos variables, asimismo aceptamos la hipótesis nula H_o : La cal como agente estabilizante de suelo no mejora las propiedades mecánicas, reduciendo el índice de plasticidad del suelo, siendo negativa para tomarse en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio

De la forma cualitativa la hipótesis estadística H_o admitida, se expresan los resultados conseguido en el ensayo respectivo.

Tabla 53 Variable del Índice de Plasticidad

CANTERA ALTO PUNO	PORCENTAJE DE CAL (%)				
	0%	2%	4%	6%	8%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	3.98%	3.34%	3.23%	2.75%	2.08%

Nota: Resumen del índice de plasticidad con la añadidura de cal.

4.2.8.2 Variable Del Valor Relativo De Soporte (CBR)

El coeficiente “r” de correlación de K. Pearson está definido por la expresión siguiente:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \sum_{i=1}^n X * \sum_{i=1}^n Y}{\sqrt{n * \sum_{i=1}^n X^2 - (\sum_{i=1}^n X)^2 * \sqrt{n \sum_{i=1}^n Y^2 - (\sum_{i=1}^n Y)^2}} = 0.2776$$

Se determinó una correlación positiva baja, por lo tanto, tenemos una directa correspondencia con relación a las variables el valor (CBR) a los cincuenta seis (56) golpes de compactación, y el porcentaje de cal adicionado al suelo natural en diferentes proporciones.

Hallamos los datos empíricos: r^2 , gl, t y p.

$$r^2 = 0.2776$$

$$gl = 4$$

$$t = -5.172$$

$$p = 0.0004$$



Se nota que el experimento tiene una correlación positiva baja de ajuste del 27.76% de la diferenciación del valor (CBR) a los cincuenta seis (56) golpes de compactación, con la adición de Cal al suelo natural.

Prueba de hipótesis para $p \neq 0$,

Tenemos la hipótesis estadística:

$$H_o: p = p_o.$$

$$H_a: p \neq p_o.$$

H_o : La cal como agente estabilizante de suelo no mejora las propiedades mecánicas, del valor relativo de soporte (CBR) de la muestra de suelo de la cantera en estudio, no tomándose en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio.

H_a = La cal estabiliza el suelo mejora las propiedades mecánicas, del valor relativo de soporte (CBR) de la muestra de suelo de la cantera en estudio, no tomándose en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio.

Tomándose en consideración lo siguiente:

$$H_o: \text{Hipótesis nula}$$

$$H_a: \text{Hipótesis alterna}$$

Considerando el nivel significancia: $\alpha = 0.05$ o 5%

La norma de disposición es: Dado “ p ” es menor o igual a “ α ” ($p \leq \alpha$), se rechaza la hipótesis nula H_o y se opta en aceptar la hipótesis alterna H_a .

$$p \leq \alpha$$

$$0.0004 \leq 0.050$$

Se concluye de lo expresado $p \leq \alpha$, existiendo suficientes argumentos para aseverar que $p \neq 0$, apuntando que el coeficiente de correlación es distinto de cero. Por lo que con este resultado demostramos y corroboramos la correlación de las dos variables, asimismo aceptamos la hipótesis alterna H_a : La cal estabiliza el suelo mejora las propiedades mecánicas, del valor relativo de soporte (CBR) de la muestra de suelo de la cantera en estudio, tomándose en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio.

De la forma cualitativa la hipótesis estadística H_a admitida, se exponen los resultados conseguido en el ensayo respectivo.

Tabla 54 Variable del Valor Relativo de Soporte (CBR)

CANTERA ALTO PUNO	PORCENTAJE DE CAL (%)				
	0%	2%	4%	6%	8%
CBR (%)	30%	73%	104%	80%	71%

Nota: Resumen del valor relativo de soporte con la adición de cal

4.2.8.3 Variable De Máxima Densidad Seca (gr/cc)

El coeficiente “r” de correlación de K. Pearson está determinado por la expresión siguiente:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \sum_{i=1}^n X * \sum_{i=1}^n Y}{\sqrt{n * \sum_{i=1}^n X^2 - (\sum_{i=1}^n X)^2} * \sqrt{n \sum_{i=1}^n Y^2 - (\sum_{i=1}^n Y)^2}} = -0.3153$$

Se ha determinado una correlación negativa alta, por lo tanto, tenemos una directa correspondencia con relación a las variables la densidad máxima seca (100%), y el % de cal agregado al suelo natural en diferentes proporciones.

Hallamos los datos empíricos: r^2 , gl, t y p.



$$r^2 = -0.3896$$

$$gl = 4$$

$$t = 1.4140$$

$$p = 0.1151$$

Se nota que el modelado tiene una correlación negativa baja ajuste del 31.96% de la diferenciación de la densidad máxima seca (100%), con la añadidura de Cal al suelo natural, representado en el estado del suelo natural al 2.02%, este valor esta expuesto por otros métodos y causas distintos al modelado.

Prueba de hipótesis para $p \neq 0$,

Tenemos la hipótesis estadística:

$$H_o: p=p_o$$

$$H_a: p \neq p_o$$

H_o : La cal estabiliza el suelo no mejora las propiedades mecánicas, de la densidad máxima seca (100%) del material de la cantera en estudio, no tomándose en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio.

H_a = La cal estabiliza el suelo mejora las propiedades mecánicas, de la densidad máxima seca (100%) de la muestra de suelo de la cantera en estudio, tomándose en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio.

Tomándose en consideración lo siguiente:

H_o : *Hipótesis nula*

H_a : *Hipótesis alterna*

Considerando el nivel significancia: $\alpha = 5\%$ o 0.05

La norma de disposición es: Dado " p " es menor o igual a α ($p \leq \alpha$), se contraría la hipótesis nula H_o y se opta en aceptar la hipótesis alterna H_a .

$$p \geq \alpha$$
$$0.1151 \geq 0.05$$

Se concluye de lo expresado $p \geq \alpha$, existiendo suficientes argumentos para aseverar que $p \neq 0$, apuntando que el coeficiente de correlación es distinto de cero. Por lo que con este resultado demostramos y corroboramos la correlación de las dos variables, asimismo aceptamos la hipótesis nula H_o : La cal estabiliza el suelo no mejora las propiedades mecánicas, de la densidad máxima seca (100%) de la muestra suelo de la cantera en estudio, no tomándose en cuenta como adecuado para el uso de conformar la subbase de la carretera en estudio.

De la forma cualitativa la hipótesis estadística H_o admitida, se muestran los resultados conseguido en el ensayo respectivo.

Tabla 55 Variable de la Densidad Máxima Seca

CANTERA ALTO PUNO MDS (gr/cc)	PORCENTAJE DE CAL				
	0%	2%	4%	6%	8%
	1.991	2.020	2.050	1.995	1.974

Nota: Resumen de la densidad máxima seca con la adición de cal.

En cuanto a la cantera de Salcedo no se realiza la prueba de hipótesis debido a que solo se cuenta con dos puntos de correlación, siendo superficial su análisis, sin embargo, este suelo se advierte como mejora su CBR a los cincuenta seis (56) golpes de compactación al agregar cal al 4%, siendo este valor óptimo y máximo con relación al CBR para la cantera de Alto Puno.



4.2.9 Análisis De Costo Unitario Para La Estabilización Química Con Cal.

4.2.10 Análisis de costo unitario de los componentes Cal, Cantera y Agua.

1. Datos preliminares:

densidad máxima seca de la muestra de suelo (cantera Alto Puno) = 2.052
gr/cc.

Peso específico de la cal = 3.08 gr/cc.

Peso específico del agua = 1.00 gr7cc.

2. Datos obtenidos del Ensayo Proctor Modificado.

- Muestra de suelo (cantera Alto Puno) = 5.0 Kg.

Cal = 4 %.

Agua = 11.55%

Peso de muestra de suelo = 5000gr. (1)

Peso de cal = 4%(5000gr) = 200gr. (2)

Peso del agua = 11.55% (5000gr) = 577.5 gr. (3)

- Añadiendo 1, 2 y 3 tenemos el peso bruto en 5 Kg de la muestra de suelo de la cantera de Alto Puno.

- Peso Bruto = 5000 gr + 200 gr + 577.5gr

- Peso Bruto = 5777.5 gr.

- Calculamos el peso bruto para 1000 gr del peso total del material de la cantera.

Material de cantera = 5777.5 gr ===== 5000 gr (M. Cantera)

1000 gr ===== X (M. Cantera)

X (M. Cantera) = 865.43 gr.

Para la cal = 5777.5 gr. ===== 200 gr. (Cal)



$$1000 \text{ gr.} \quad \text{=====} \quad Z \text{ (Cal)}$$

$$Z \text{ (Cal)} = 34.62 \text{ gr.}$$

$$\text{Para el agua} \quad = \quad 5777.5 \text{ gr} \quad \text{=====} \quad 577.5 \text{ gr (agua)}$$

$$1000 \text{ gr} \quad \text{=====} \quad W \text{ (agua)}$$

$$W \text{ (agua)} = 99.96 \text{ gr.}$$

Síntesis para 1000 gr o 1 Kg de peso total

$$M. \text{ Cantera} = 865.43 \text{ gr.}$$

$$\text{Cal} = 34.62 \text{ gr.}$$

$$\text{Agua} = 99.96 \text{ gr.}$$

- **Cálculos para cada peso a m^3 dividiendo entre sus pesos específicos.**

$$M. \text{ Cantera} = \frac{865.43 \text{ gr}}{2.052 \text{ gr/cm}^3} = 421.75 \text{ cm}^3$$

$$\text{Cal} = \frac{34.62 \text{ gr}}{3.08 \text{ gr/cm}^3} = 11.24 \text{ cm}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{99.96 \text{ gr}}{1.00 \text{ gr/cm}^3} = 99.96 \text{ cm}^3$$

- **Hallamos el volumen total de los tres componentes.**

$$V_t = 421.75 \text{ cm}^3 + 11.24 \text{ cm}^3 + 99.96 \text{ cm}^3$$

$$V_t = 532.95 \text{ cm}^3.$$

- **Calculamos para cada componente por $1 m^3$**

$$M. \text{ Cantera} = 421.75 \text{ cm}^3 \quad \text{=====} \quad 548.34 \text{ cm}^3$$

$$X' \text{ (m}^3) \quad \text{=====} \quad 1 \text{ m}^3$$

$$X' \text{ (m}^3) = 0.7691 \text{ m}^3$$



$$\text{Cal} = 11.24 \text{ cm}^3 \text{ ===== } 548.34 \text{ cm}^3$$

$$Y' (\text{m}^3) \text{ ===== } 1 \text{ m}^3$$

$$Y' (\text{m}^3) = 0.0205 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua} = 99.96 \text{ cm}^3 \text{ ===== } 548.34 \text{ cm}^3$$

$$Z' (\text{m}^3) \text{ ===== } 1 \text{ m}^3$$

$$Z' (\text{m}^3) = 0.182 \text{ m}^3$$

El análisis de costo unitario de los elementos, el material de cantera y el agua serán expresados en m^3 y la cal estará expresado en Kg. Tal como continuación se detalla:

$$\text{Cal} = 3.08 \text{ gr} \text{ ===== } 1 \text{ cm}^3 (\text{cal})$$

$$A (\text{gr}) \text{ ===== } 0.0205 \text{ m}^3 (\text{cal})$$

$$A_{\text{cal}} (\text{gr}) = 63.13 \text{ gr.}$$

Tabla 56 La dosificación por 1 m^3

La dosificación por 1 m^3	
M. Cantera (Alto Puno)	0.7691 m^3
Cal	63.1300 gr
Agua	0.182 m^3

Nota: Valores determinados con los cálculos respectivos.

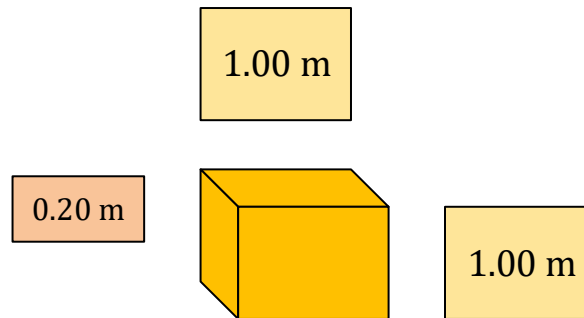
El desperdicio de los componentes para el presente análisis será 0.7 % (Según la Cámara Peruana de la Construcción).

$$\text{M. Cantera (Alto Puno)} (\text{m}^3) = 0.7691 \text{ m}^3 * 1.07 = 0.8229 \text{ m}^3.$$

$$\text{Cal (gr)} = 63.1300 \text{ gr} * 1.07 = 67.5491 \text{ gr.}$$

$$\text{Agua (m}^3) = 0.182 \text{ m}^3 * 1.07 = 0.1947 \text{ m}^3$$

Finalmente realizamos el análisis del costo unitario para la Sub Base con un espesor de 0.20 m para 1 m², a la vez calcularemos sus componentes para 1 m².



$$\text{Volumen Total} = 0.20 \text{ m} * 1.00 \text{ m} * 1.00 \text{ m} = 0.20 \text{ m}^3$$

Cantidad por m²

$$\text{M. Cantera} = 0.8229 \text{ m}^3 * 0.20 = 0.1646 \text{ m}^3 \text{ por m}^2.$$

$$\text{Cal} = 67.5491 \text{ Kg} * 0.20 = 13.5098 \text{ Kg por m}^2.$$

$$\text{Agua} = 0.1947 \text{ m}^3 * 0.20 = 0.0389 \text{ m}^3 \text{ por m}^2.$$

Tabla 57 *Análisis De Precios Unitarios De La Cantera de Alto Puno.*

Presupuesto	0103001	ESTABILIZACIÓN QUÍMICA CON CAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUB BASE DEL TRAMO KM 08+000 AL 10+000 DE LA CARRETERA PUNO MAÑAZO.					
Subpresupuesto	001	ESTABILIZACIÓN QUÍMICA CON CAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUB BASE DEL TRAMO KM 08+000 AL 10+000 DE LA CARRETERA PUNO MAÑAZO.					
Partida	EXTENDIDO, RIEGO Y COMPACTACIÓN DE MATERIAL DE CANTERA CON AGENTE ESTABILIZANTE CAL						
Rendimiento	m2/DÍA	1,600.0000	EQ.	1,600.00 00	Costo unitario directo por : m2	79.45	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de Obra						
0101010004	OFICIAL		hh	4.0000	32.0000	7.72	247.04
0101010005	PEÓN		hh	0.5000	4.0000	8.34	33.36
							280.40
	Materiales						
0207070002	AGUA		m3		0.2420	1.50	0.36
0207120001	MATERIAL DE CANTERA		m3		0.1646	15.00	2.47
0213020002004	CAL HIDRATADA BOLSA 30 kg		bol		13.5098	5.50	74.30
							77.13
	Equipos						
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	280.40	8.41
0301530001	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 7- 9 ton		hm	1.0000	8.0000	150.00	1,200.00
0301540001	MOTONIVELADORA 130 - 135 HP		hm	1.0000	8.0000	136.00	1,088.00
0301550001	CAMIÓN CISTERNA (2,000 GLNS.)		hm	1.0000	8.0000	140.00	1,120.00
							3,416.41
Partida	MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE MAQUINARIA Y EQUIPO						
Rendimiento	und/DÍA	1.0000	EQ.	1.0000	Costo unitario directo por : und	5,000.0 0	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Subcontratos						
0416010001	SC MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPOS		und		1.0000	5,000.00	5,000.00
							5,000.00
Partida	TRAZO, NIVELACIÓN Y REPLANTEO						
Rendimiento	m2/DÍA	600.0000	EQ.	600.000 0	Costo unitario directo por : m2	4.34	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO		hh	1.0000	8.0000	10.20	81.60
0101010005	PEÓN		hh	3.0000	24.0000	8.34	200.16
							281.76
	Materiales						



0213070001	YESO BOLSA 28kg	bol	0.0015	10.00	0.02	
0291010001	ESTACAS DE MADERA TORNILLO TRATADA	p2	0.0200	35.00	0.70	
0.72						
Equipos						
0301000011	TEODOLITO	hm	1.0000	8.0000	85.00	680.00
0301000013	NIVEL TOPOGRÁFICO C/TRÍPODE Y MIRA	hm	1.0000	8.0000	150.00	1,200.00
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	3.0000	281.76	8.45	
1,888.45						

Partida TRAZO Y REPLANTEO DURANTE EL PROCESO

Rendimiento	m2/DÍA	400.0000	EQ.	400.0000	Costo unitario directo por : m2	6.82	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
0101010003	OPERARIO		hh	1.0000	8.0000	10.20	81.60
0101010005	PEÓN		hh	3.0000	24.0000	8.34	200.16
281.76							
Materiales							
0213070001	YESO BOLSA 28kg		bol		0.0015	10.00	0.02
0240020001	PINTURA ESMALTE		gal		0.0015	50.00	0.08
0.10							
Equipos							
0301000013	NIVEL TOPOGRÁFICO C/TRÍPODE Y MIRA		hm	1.0000	8.0000	150.00	1,200.00
0301000014	TEODOLITO C/TRÍPODE Y MIRA		hm	1.0000	8.0000	150.00	1,200.00
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES		%mo	3.0000	281.76	8.45	
2,408.45							

Partida CARGUÍO Y ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE Dpro.= 5 km

Rendimiento	m3/DÍA	392.0000	EQ.	392.0000	Costo unitario directo por : m3	69.35	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
0101010003	OPERARIO		hh	0.1000	0.8000	10.20	8.16
0101010005	PEÓN		hh	2.0000	16.0000	8.34	133.44
141.60							
Materiales							
0201040002	PETRÓLEO B5		gal		3.3333	16.50	55.00
55.00							
Equipos							
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	141.60	4.25
0301560001	CARGADOR SOBRE LLANTAS DE 160-195 HP 3.5 yd3		hm	1.0000	8.0000	185.00	1,480.00
0301570001	CAMIÓN VOLQUETE DE 15 m3		hm	4.0000	32.0000	125.00	4,000.00
5,484.25							

Partida PERFILADO Y COMPACTADO DE SUB BASE EN ZONA DE CORTE C/MAQUINARIA



Rendimiento	m2/DÍA	1,500.0000	EQ.	1,500.00 00	Costo unitario directo por : m2	9.90	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
0101010003	OPERARIO		hh	1.0000	8.0000	10.20	81.60
0101010005	PEÓN		hh	5.0000	40.0000	8.34	333.60
							415.20
Materiales							
0201040002	PETRÓLEO B5		gal		0.4520	16.50	7.46
							7.46
Equipos							
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	415.20	12.46
0301510001	MOTOBOMBA DE 4" (12 HP)		hm	0.5000	4.0000	95.00	380.00
0301530001	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 7- 9 ton		hm	1.0000	8.0000	150.00	1,200.00
0301540001	MOTONIVELADORA 130 - 135 HP		hm	1.0000	8.0000	136.00	1,088.00
0301550001	CAMIÓN CISTERNA (2,000 GLNS.)		hm	0.5000	4.0000	140.00	560.00
							3,240.46

Partida **CONFORMACIÓN DE SUB BASE CON MATERIAL GRANULAR CON CAL=0.20 M
C/MAQUINARIA**

Rendimiento	m2/DÍA	700.0000	EQ.	700.000 0	Costo unitario directo por : m2	45.26	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
0101010003	OPERARIO		hh	1.0000	8.0000	10.20	81.60
0101010005	PEÓN		hh	5.0000	40.0000	8.34	333.60
							415.20
Materiales							
0201040002	PETRÓLEO B5		gal		0.4520	16.50	7.46
0207080001	MATERIAL GRANULAR PARA SUB- BASE		m3		0.2700	45.00	12.15
0207080002	CAL HIDRATADA BOLSA 30 kg		bol		13.5098	5.50	74.30
							93.91
Equipos							
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		3.0000	415.20	12.46
0301510001	MOTOBOMBA DE 4" (12 HP)		hm	1.0000	8.0000	95.00	760.00
0301530001	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 7- 9 ton		hm	1.0000	8.0000	150.00	1,200.00
0301540001	MOTONIVELADORA 130 - 135 HP		hm	1.0000	8.0000	136.00	1,088.00
0301550001	CAMIÓN CISTERNA (2,000 GLNS.)		hm	1.0000	8.0000	140.00	1,120.00
							4,180.46

Partida **IMPLEMENTACIÓN DE EDUCACIÓN VIAL**

Rendimiento	und/DÍA		EQ.		Costo unitario directo por : und	5000.0 0	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Subcontratos							



0428010001	SC IMPLEMENTACIÓN DE EDUCACIÓN VIAL	und	1.0000	5000	5000.00	5000.00
------------	-------------------------------------	-----	--------	------	---------	----------------

Partida TRANSPORTE DE CAL A Dp 55=KM						
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de Obra					
Rendimiento	m3/DÍA	EQ.			Costo unitario directo por : und	28.90
		60.000				
0101010005	OFICIAL	hh	1.0000	0.1333	18.56	2.47
						2.47
	Materiales					
0201040002	CAMIÓN VOLQUETE	hm	1.0000	0.1333	198.26	26.43

Realizado el análisis de precios unitarios de las partidas indispensables para proyecto de la vía, es menester precisar que la única diferencia es el costo del insumo cal y el material de cantera, en cuanto a la cal el precio aproximado de una bolsa de cal de 10 kilos es de S/ 5.5 a 6.0, en cuanto al material de cantera a un costo mínimo a donación de la comunidad del lugar, asimismo se debe considerar que los demás componentes (mano de obra, materiales, equipos y herramientas) sus precios están estandarizados de acuerdo a la zona de trabajo. por tanto, se tiene el análisis de acuerdo al cuadro de costo a proyección de la vía:

Tabla 58 Propuesta de presupuesto para el mejoramiento a nivel de subbase de la vía Puno Mañazo.

PRESUPUESTO	
PROYECTO :	: ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELO CON CAL EL MEJORAMIENTO DE SUB BASE DEL TRAMO KM 08+000 AL 10+000 DE LA CARRETERA PUNO-MAÑAZO"
COMPONENTE :	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
LUGAR:	PUNO-PUNO-PUNO
PRESUPUESTO (S/.):	263,048.60

Ítem	Partidas	Und	Metrado	Precio Unitario S/.	Parcial
					(S/.)
01	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS INCORPORANDO CAL				
01.01	COSTO DE LABORATORIO	glb	1.00	1600.00	1,600.00
01.02	ANÁLISIS QUÍMICO DE CAL, SUELO Y AGUA	glb	1.00	600.00	600.00
01.03	TRAZO, NIVELACIÓN Y REPLANTEO	m2	400.00	4.34	1,736.00
01.04	TRAZO Y REPLANTEO DURANTE EL PROCESO	m2	400.00	6.82	2,728.00
01.05	CARGUÍO Y ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE	m3	200.00	69.35	13,870.00
01.06	PERFILADO Y COMPACTADO DE SUB BASE EN ZONA DE CORTE C/MAQUINARIA	m2	400.00	9.90	3,960.00
01.07	MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPO	glb	1.00	5000.00	5,000.00
01.08	MEJORAMIENTO DE LA SUB BASE CON CAL	m3	2800.00	79.45	222,460.00
01.09	TRANSPORTE Dp = 55 km.	m3	114.00	28.90	3,294.60
01.10	PLAN MANEJO AMBIENTAL	m7	1.00	7800.00	7,800.00
COSTO DIRECTO				263,048.60	

Nota: Adaptado del análisis del precio unitario.



V. CONCLUSIONES

La cal como agente estabilizante de suelos si mejora las propiedades mecánicas del material de las canteras Alto Puno y Salcedo, considerándolo idóneo para su empleo para la disposición como capa de la subbase de pavimentos.

Ejecutados los ensayos con la cantera de Alto Puno con la adición de cal, como son características de los suelos, Abrasión desgaste de Los Ángeles, Proctor modificado y valor relativo de soporte (CBR) y comparándolos con los requerimientos mínimos de la norma EG 2013 del MTC, se alcanza a determinar que el porcentaje óptimo de cal es de 4%, observándose principalmente el acrecentamiento del valor relativo de soporte CBR incrementado desde 30% a 104%, índice de plasticidad 3.23 % y abrasión 49%, valores aptos e indicados para la conformación de la subbase de la carretera y tramo especificado, ya que la norma estipula un CBR mínimo de 40%, índice de plasticidad de 4% y abrasión 50% máximos para alturas mayores a 3000 msnm.

La adición de cal reduce notablemente la plasticidad de los suelos, especialmente para el suelo de la cantera de Alto Puno el cual tuvo un índice de plasticidad de 3.98% en su fase natural y con la añadidura de cal disminuyo hasta 2.08%. En cuanto a la cantera de Salcedo se consiguió un índice de plasticidad de 9.56%, y con la suma de cal disminuyo hasta 2.19%, evidenciándose con estos resultados la cal hace que los suelos disminuyan su plasticidad.

Finalmente, para efectos de contraste se ha realizado los ensayos de laboratorio para la cantera de Salcedo, al cual se ha adicionado porcentaje óptimo de cal de 4% obtenido de los ensayos de laboratorio practicado a la cantera de Alto Puno, en donde se alcanzó que la propiedad mecánica del suelo, en cuanto a su valor relativo de soporte (CBR) ha alcanzado un crecimiento positivo desde 7% en su estado natural hasta a 114%



con la adición de cal al 4%, asimismo su índice de plasticidad disminuyó desde 9.56 % hasta 2.19%.



VI. RECOMENDACIONES

A fin de conocer más extensamente la influencia y comportamiento de la cal en los suelos, se recomienda realizar más ensayos y pruebas de laboratorio con diferentes tipos de suelos de canteras provistas en nuestra región de Puno o a nivel nacional.

La aceptación de los resultados o rechazos de los mismos: el valor relativo de soporte (CBR), el índice de plasticidad y la densidad máxima seca, los cuales fueron conseguidos de los ensayos de laboratorio para la estabilización de suelos, su aceptación obedecerá a las normativas, normas y especificaciones técnicas vigentes, para cada obra civil en la rama de infraestructura vial en donde se aplicará este tipo de estabilización.

Se sugiere el uso de la cal de nuestra región de Puno, ya que existe en diferentes zonas yacimientos fructíferos que actualmente no son explotados, siendo una alternativa para la estabilización de suelos, en cuanto al presente proyecto de investigación se sugiere la adición de cal entre 4% a 6% para mejorar y estabilizar los suelos con cal, teniendo en cuenta el tipo de suelo a tratar.

En cuanto al momento de realizar las pruebas y ensayos de laboratorio se sugiere tener en cuenta los procedimientos y protocolos descritos en las normas y especificaciones técnicas a fin de obtener resultados efectivos y con veracidad, además tener los equipos de laboratorio en óptimas condiciones y calibrados.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcon, J., Jimenez, M., & Benitez, R. (2020). Revista Scielo. *Ingenieria De Construccion*, 35.
- Ancade, Anter, & Ieca. (2010). *Manual De Estabilización De Suelos Con Cemento O Cal*. Madrid: Vaqueros Servicios De Publicaciones.
- Aza MORALES, P. D. (S.F.). Trabajo De Investigacion. En p. D. Aza Morales, *Materiales De Construccion* (págs. 5-11). Puno.
- Badilla , V. G., & Elizondo, A. F. (2010). Mejoramiento Y Estabilización De Subrasantes Con Cal. *Pitra*, 5.
- Bowles, j. (1981). *Manual De Laboratorio De Suelos En Ingenieria Civil*. Mexico: Mcgraw-Hill.
- Braja M., D. (2011). *Fundamentos De Ingeniería Geotécnica* . Mexico: Thomson Learning, S.A. C.v.
- C.A., J. H. (s.f.). Clasificacion De Las Fallas De Pavimentos Flexibles Y Rigidos. *Academia*, 22.
- Carranza Gomez, J. S. (2021). *Estabilización De Suelos Incorporando Cal Y Yeso Como Aglomerantes Naturales En El Tramo La Capilla- Cedropampa Cajamarca 2021*. Universidad Cesar Vallejo, Cajamarca.
- Chakraborty, S., & Nair, S. (2017). Impact Of Different Hydrated Cementitious Phases On Moisture-Induced Damage In Lime-Stabilise Subgrade Soils. *Road Materials And Pavement Design*.



- Contreras avila, j. F., & garcia garcia, a. E. (2019). *Correlacion Del Penetrometro Dinamico De Cono (P.D.C) Con Ensayo De Relacion De Soporte De California (C.B.R) Para Suelos En La Localidad De Engativa De La Ciudad De Bogota.* Facultad de Ingenieria Programa De Ingenieria Civil, bogota.
- Coronado Zuloeta, O. (2020). Estabilizacion De Suelos Granulares No Cohesivos De Lambayeque Aplizando Bacterias Calcificantes. *Tzhoecoen.*
- Crespo Villalaz , C. (2004). *Mecanica De Suelos Y Cimentaciones* . Mexico: Limusa.
- Cuadros, S. C. (2016). Mejoramiento De Las Propiedades Físico -Mecánicas De La Sub Rasante En Una Via Afirmada De La Red Vial Departamental De La Region Junin Mediante La Estabilizacion Quimica Con Oxido De Calcio - 2016. Universidad Peruana Los Andes, Junin.
- Doroteo, c. C. (2014). Mejoramiento De Suelos Por Sustitucion De Material. Benemerita Universidad Autonoma De Puebla, Mexico.
- Edificaciones, R. N. (2006). *Estabilizacion De Suelos Y Taludes (c-20)*. Lima: Megabyte.
- Gonzales Boada, J. (2005). *Clasificacion De Suelos De Acuerdo A SUCS Y AASTHO*. Barcelona: Universidad De Granadas.
- Gonzalez De Vallejo, L., Ferrer, M., & Ortuño , L. (2022). *Ingeniería Geologica*. Madrid: Pearson Educacion, S.A.
- Hernandez, F. A. (2021). Comportamiento Mecánico De Un Suelo Arcilloso Estabilizado Con Puzolonas Y Cal Como Material Para Capa Sub Base. Universidad Autonoma De Queretaro, Mexico.
- Hernandez, S. R., fernandez , C. C., & Baptista, L. M. (2014). *Metodologia De La Investigacion*. Mexico: MC Graw Hill.



- Huaquisto Cacéres, S. (2012). *Mecanica de suelos Manual De Laboratorio*. Puno: UNAP.
- Huezo Maldonado , H. M., & Orellana Martinez , A. C. (2009). *Guia Basica Para Estabilizacion De Suelos [Tesis De Licenciatura Universidad De El Salvador]*. Repositorio Institucional, El Salvador.
- Juarez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (1998). *Mecanica De Suelos Tomo 1*. Mexico: Limusa, S.A. De C.V.
- Lambe Y Whitman. (1996). *Mecanica De Suelos*. Mexico: D.F. Limusa.
- Leon, V. W. (2013). *Prueba de Hipotesis I. Prueba De Hipotesis I*. Universidad Nacional Mayor De San Marcos, Lima.
- Marquez , O. J. (2001). *Estabilizacion De Suelos Con Cal En La Construccion. ACADEMIA*, 9.
- Mendoza , M. M., & Guadarrama, R. J. (2008). *Bases Y Subbases*. Escuela Superior De Ingenieria Y Arquitectura, Mexico.
- Minaya, G. S., & Ordoñez, H. A. (2001). *Manual De Laboratorio Ensayos Para Pavimentos Volumen I*. Lima : UNI.
- MTC. (2014). *Manual De Carreteras Suelos Geologia, Geotecnia Y Pavimentos Seccion Suelos Y Pavimentos*. Lima: R.D. N° 10-2014-MTC/14.
- MTC, & EG. (2013). *Manual de Carreteras Generales Para La Costruccion*. Lima.
- MTC-2013, M. D. (s.f.). *Manual De Carrteras Especificaciones Tecnicas Generales Para La Construccion. R.D. N° 22-2013-MTC/14*. MTC, Lima.
- Navarro, A. E. (2014). *Guia Para La Interpretacion De Resultados En El Contrastes De Hipotesis Estadisticas*. Madrid.



- Palli Apaza, E. (2015). *Guia Basica Para Estabilizacion De Suelos Con Cal En Caminos De Baja Intensidad Vehicular En La Provincia De San Roman*. UNAP, Puno.
- Quispe, s. F. (2014). *Estabilización De Suelos No Aptos Con Desechos De Policloruro De Vinilo Para Su Uso En La Coformacion De La Capa Base Y Sub Base De Pavimentos*. Universidad Nacional Del Altiplano, Puno.
- Rodriguez , M. M., & hidalgo, M. C. (2005). *Revista Ingenierías Universidad De Medellín. Comportamiento De Suelos Residuales De Diorita Estabilizados Con Cal Y Su Evolucion En El Tiempo*, 13.
- Rodriguez, e. P. (2009). *Prueba De Hipotesis*. Puerto Rico.
- Sampedro Rodriguez, a. (2005). *Tratamiento de Suelos Con Cal*. Madrid: ANCADE.
- Suarez, M. (2012). *Correlación Y Regresión Empleando Excel Y Graph. 2012*. Universidad Técnica del Norte Tapia, Fausto, Ecuador.
- Velarde Del Castillo, A. D. (2015). *Aplicación De La Metodología De Superficie De Respuesta En La Determinacion De La Resistencia A La Compresion Simple De Suelos Arcillosos Estabilizados Con Cal Y Cemento*. EPIC. Universidad Nacional Del Altiplano, Puno.
- Viscarra Agreda , F. (2005). *El Cono Dinamico De Penetracion Y Su Aplicacion En La Evaluacion De Suelos*. 16.



ANEXOS

PANEL FOTOGRÁFICO

**ENSAYOS Y FICHAS DE LABORATORIO DE SUELOS CALITA C-1 Y C-2, KM
08+750 Y 09+300.**

ENSAYOS Y FICHAS DE LABORATORIO CANTERA ALTO PUNO

ENSAYOS Y FICHAS DE LABORATORIO CANTERA SALCEDO

CERTIFICADOS DE LABORATORIO DE SUELOS.