



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

“DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA
SUBRASANTE INCORPORANDO CAL ESTRUCTURAL EN
EL SUELO LIMO ARCILLOSO DEL SECTOR 14
MOLLEPAMPA DE CAJAMARCA, 2015”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Civil

Autora:

Anabelén García Gonzales

Asesor:

Ing. Alejandro Cubas Becerra

Cajamarca – Perú
2015

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por la Bachiller **Anabelén García Gonzales**, denominada:

**“DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE
INCORPORANDO CAL ESTRUCTURAL EN EL SUELO LIMO ARCILLOSO
DEL SECTOR 14 MOLLEPAMPA DE CAJAMARCA, 2015”**

Ing. Alejandro Cubas Becerra
ASESOR

Dr. Ing. Orlando Aguilar Aliaga
**JURADO
PRESIDENTE**

Ing. Teresa Chávez Toledo
**JURADO
SECRETARIO**

Ing. Anita Alva Sarmiento
**JURADO
VOCAL**

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos y metas

A mis padres, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, capaz de afrontar los problemas día a día, quienes merecen más que el título que quiero obtener, siempre los partícipes de todos mis logros y mi formación. Gracias

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primero a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, metas, quien siempre me guio en mi camino.

Especialmente agradezco a mis padres, por sus sabias enseñanzas y por el sacrificio que hicieron por mí. Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores y por la motivación constante de mejorar.

A mi asesor, el Ingeniero Alejandro Cubas Becerra por sus ideas y recomendaciones que sirvieron para la culminación de este tema de investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DE LA TESIS.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT.....	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Realidad problemática	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Limitaciones	2
1.5. Objetivos	2
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	2
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	2
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Bases Teóricas	4
2.2.1. <i>Cal</i>	4
2.2.2. <i>Subrasante - Suelo</i>	6
2.2.2.1. <i>Tipos de suelo: clasificación AASHTO</i>	6
2.2.2.2. <i>Tipos de suelo: clasificación SUCS</i>	10
2.2.2.3. <i>Ensayos de laboratorio</i>	12
2.2.3. <i>Estabilización del suelo con cal</i>	27
2.3. Definición de términos básicos.....	28
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS.....	31
3.1. Formulación de la hipótesis.....	31
3.2. Operacionalización de variables	31
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS	33
4.1. Tipo de diseño de investigación.....	33
4.2. Material de estudio.....	33
4.2.1. <i>Unidad de estudio</i>	33
4.2.2. <i>Población</i>	33
4.2.3. <i>Muestra</i>	33
4.3. Técnicas, procedimientos e instrumentos.....	33
4.3.1. <i>Para recolectar datos</i>	33

4.3.2. <i>Para analizar información.</i>	45
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	68
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN	69
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS	75
ANEXOS	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Nº1: Correlación entre el sistema AASHTO y ASTM.....	08
Tabla Nº2: Clasificación de suelos – Método AASHTO.....	09
Tabla Nº3: Clasificación SUCS.....	10-11
Tabla Nº4: Características de suelos según sus Índices de plasticidad.....	15
Tabla Nº5: Índice de grupo.....	17
Tabla Nº6: Resumen ensayo proctor estándar y proctor modificado.....	21
Tabla Nº 7: Lecturas de penetración – CBR.....	26
Tabla Nº 8: Operacionalización de variables.....	31
Tabla Nº 9: matriz de consistencia.....	32

RESUMEN

Para el diseño de infraestructuras viales, es importante tener el valor de la resistencia de la subrasante (CBR) por lo que se necesita que este valor sea óptimo para así disminuir el espesor de las capas de sub-base, base y capa de rodadura.

El objetivo principal de este trabajo es investigar si al incorporar cal al suelo natural en los porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8%, éste aumenta su resistencia y disminuye su plasticidad.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación primero se procedió a la obtención de muestras por medio de 02 calicatas de 1.50m de profundidad donde el estrato a analizar se obtuvo a 40 cm aproximadamente de excavación, después se analizó el suelo en el laboratorio obteniendo por medio de los ensayos granulométrico y límites de Atterberg, un suelo limo arcilloso según la clasificación SUCS y AASHTO.

Posteriormente se realizó en el laboratorio de suelos los siguientes ensayos: Límites de Atterberg, Proctor Modificado y California Bearing Ratio para cada muestra incorporándole las cantidades de cal ya mencionadas. Se procedió a determinar los valores de: Limite Líquido, Limite plástico e Índice de plasticidad por medio del ensayo de los Límites de Atterberg, Optimo contenido de humedad y Densidad Máxima Seca por medio del ensayo de Proctor Modificado y CBR al 95% de la Densidad Máxima Seca al 0.1" y 0.2" por medio del ensayo California Bearing Ratio.

Al procesar los datos de los diferentes ensayos realizados, se confirma que la cal aumenta progresivamente en los porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% la resistencia de la subrasante limo arcillosa teniendo así el CBR al 0.1": con un suelo natural un CBR de 5.20%, incorporando 2% de cal un CBR de 5.30%, incorporando 4% de cal un CBR de 6.30%, incorporando 6% de cal un CBR de 7.20%, e incorporando 8% de cal un CBR de 8.05; CBR al 0.2": con un suelo natural un CBR de 5.40%, incorporando 2% de cal un CBR de 5.70%, incorporando 4% de cal un CBR de 6.60%, incorporando 6% de cal un CBR de 7.50%, e incorporando 8% de cal un CBR de 8.30%

ABSTRACT

For the design of road infrastructure, its importance to have the resistance value of the subgrade (CBR) is needed so that this value is optimal to reduce the thicknesses of the layers of sub-base, base and wearing course.

The main objective of this work is to investigate whether incorporating natural lime soil in the percentage of 2%, 4%, 6% and 8%, it increases their resistance and decreases its plasticity.

For the development of this research project we proceeded to first sampling by 02 1.50m deep pits where the layer to be analyzed is obtained approximately 40 cm excavation, after the ground was analyzed in the lab getting by through the sieve tests and Atterberg limits, a clay loam soil according to USCS and AASHTO classification.

Atterberg limits, Proctor Modified and California Bearing Ratio for each sample incorporating the aforementioned amounts of lime: then the following tests are performed in the laboratory floor. He proceeded to determine the values of: liquid limit, plastic limit and plasticity index by testing the limits of Atterberg, optimum moisture content and MDD by trial Modified Proctor and CBR 95% Density Maximum Seca 0.1 "and 0.2" by the California Bearing Ratio test.

When processing data from various tests, it is confirmed that lime increases progressively in porcentajes 2%, 4%, 6% and 8% the strength of silt and clay subgrade CBR having 0.1 "with a floor Natural a CBR of 5.20%, 2% lime incorporating a CBR of 5.30%, 4% lime incorporating a CBR of 6.30%, 6% lime incorporating a CBR of 7.20% and 8% lime incorporating a CBR of 8.05 ; CBR 0.2 "with a natural ground a CBR of 5.40%, 2% lime incorporating a CBR of 5.70%, 4% lime incorporating a CBR of 6.60%, 6% lime incorporating a CBR of 7.50%, and incorporating 8% of lime a CBR of 8.30%.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a variaciones en su contenido de agua (expansiones o contracciones) o a cambios extremos de temperatura, pueden absorberse con la capa subbase e impedir que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento. Tenemos un claro ejemplo de suelos blandos típicos en Colombia los cuales tienen las siguientes características:

- Suelos Turbosos (Pt)
- Limos Orgánicos (Humedad Natural alta, Limite Líquido >50. Índice de Plasticidad < 0.73 (Limite líquido - 20). Límite Líquido cambia con el secado al aire.
- Limos inorgánicos con Limite líquido >50 y alta Humedad natural.
- Arcillas con alto Límite Líquido (Limite líquido >50) y Humedad natural cercana al Límite Líquido.

(Álvarez - ICPC, 2010)

En la calle Faustino Sánchez Carrión en el tramo comprendido entre la avenida Bolognesi y la avenida Pedro de Osma, en el distrito de Barranco, Lima – Perú. Se realizó un estudio de suelos con la finalidad de determinar las características del perfil de la subrasante. Los suelos más desfavorables y que predominan al nivel de la subrasante son las arcillas y limos de plasticidad baja a media, medianamente compactos. A estos suelos le corresponde un valor de CBR de 7%. (M y M Consultores S.R.L, 2006)

La ciudad de Cajamarca cuenta en su mayoría con suelos limo arcillosos, que son regulares a buenos en épocas de sequía pero al existir presencia de lluvias disminuyen su resistencia y con ella la del pavimento, creando así infraestructuras viales deficientes. Este estudio se realizará sector 14 Mollepampa; ya que Cajamarca actualmente se está expandiendo por ese sector y es de gran importancia que todo el sector 14 cuente con una adecuada infraestructura vial para poder brindar a la población mejor calidad de vida.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo influye la cal estructural en la resistencia de la subrasante en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca, 2015?

1.3. Justificación

Esta investigación nos permitirá conocer si la cal realmente aumenta la resistencia y disminuye su índice de plasticidad, ya que en Cajamarca aún no se cuenta con investigaciones similares de este tema, por lo que este estudio ayudará a tener otra alternativa de solución para mejorar suelos limo arcillosos con un valor de CBR menor al 6%, además al aumentar el valor de CBR, éste aportará mayor resistencia a la sub-base, base y capa de rodadura del pavimento que está en contacto con las cargas externas. Se realizará también para enriquecer los conocimientos de mecánica de suelos.

1.4. Limitaciones

No se cuenta con limitaciones en este proyecto de investigación.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar la resistencia de la subrasante al incorporar cal estructural en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la resistencia de la subrasante limo arcillosa al incorporar cal estructural en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8%
2. Determinar la variación del índice de plasticidad del suelo limo arcilloso cuando se utiliza cal estructural en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8%.
3. Determinar la variación de la densidad máxima seca del suelo limo arcilloso cuando se incorpora cal estructural en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8%.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Aunque hace ya más de 50 años que en España empezaron a estabilizarse en algunos caminos agrícolas los suelos de los mismos, su aplicación masiva en carreteras y aeropuertos de España sólo data de mediados de la década final del siglo XX, gracias al empleo de las modernas estabilizadoras. Estos potentes equipos que son muy eficaces en la mezcla in situ del suelo con cal, consiguieron tener, con un rendimiento muy elevado, capas de gran espesor con un material uniforme. Muchos suelos naturales son de calidad mediocre, por lo que su aprovechamiento solo es posible mediante su mejora o estabilización con cal para conseguir una elevada capacidad de soporte. (IECA, ANCADE y ANTER, 2008)

En el estudio titulado: Estabilización de suelos cohesivos con cal, tuvo como objetivo dar a conocer la Cal como estabilizador de suelos en obras viales, analizando la influencia de este producto en un suelo de alta plasticidad. El trabajo comienza con una investigación minuciosa de la estabilización de suelos con Cal. Así también se señalan los materiales y métodos utilizados para evaluar este producto por intermedio de ensayos de laboratorio, estudiando los efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

Este análisis, se realizó de acuerdo a un supuesto de diseño, en donde, se calcularon las características de la base estructural para un pavimento flexible de acuerdo a los datos obtenidos en laboratorio. Como conclusión general se puede validar el producto como una alternativa concreta para la estabilización de suelos, ya que, debido a la capacidad de mejorar las características básicas del suelo, aportando capacidad de soporte al mismo. (Vásquez, 2008)

La adición de cal a un suelo con una fracción de partículas finas relevante modifica su comportamiento por una conjunción de sus propiedades. Los mecanismos que intervienen en este proceso, que se resume fundamentalmente en dos manifestaciones típicas:

a) Una modificación de la textura del suelo

b) Un incremento de su resistencia.

Estos hechos se producen en mayor o menor medida según el tipo de suelos, su granulometría y mineralogía, y el de la cal empleada, en función de su riqueza y actividad. Su justificación está en la alteración del estado natural de ambos materiales por las reacciones químicas que se producen en la interacción de sus estructuras. (Bauzá, 2003)

En el estudio titulado, estabilización de subrasantes con cal, esta tesis tuvo como objetivo mostrar las mejoras del comportamiento de un suelo de mala calidad, al incorporarle varios porcentajes de cal, en función de su peso seco, teniendo en cuenta que el suelo funcionará como subrasante dentro de la estructura del pavimento. Esta tesis se realizó en tres etapas, la primera fue la recolección de información, la segunda la fase de laboratorio, llevándose a cabo ensayos de Proctor (densidad – humedad), CBR (valor soporte), límite líquido, límite plástico, granulometría y absorción por capilaridad; y por último el análisis de los resultados. Se llegó a la conclusión que los porcentajes de cal disminuyeron la plasticidad, aumentaron su valor soporte y crearon una capa protectora contra el agua que sube por capilaridad, es decir, pasa de ser un suelo baja a uno de buena calidad como subrasante. (Angulo, 2004)

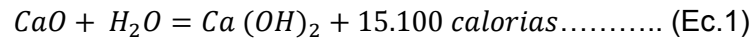
En la ciudad de Cajamarca, aun no se han realizado estudios de estabilización de suelos con cal en suelos limo arcillosos o suelos con un valor de CRB menor al 6%, por lo que no se tiene antecedentes de esta investigación en el ámbito local.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Cal

La cal es un aglomerante que procede de la calcinación de piedras calizas, como consecuencia de las variaciones de composición de la roca puede obtenerse una serie de cales, que varían desde cales muy puras; altamente cálcicas, hasta altamente hidráulicas, teniendo así dos tipos fundamentales de cales:

Cal viva: es un producto compuesto por óxido de calcio CaO, posee una gran avidéz para el agua, con la que reacciona de la siguiente manera:



Produciendo hidróxido cálcico Ca (OH)₂, denominada cal apagada o cal hidratada; este tipo de cal desprende calor, elevando su temperatura a unos 160° C., pulverizándose y aumentando considerablemente de volumen aparente. (Villarino, 2010)

En esta investigación se utilizó el término **cal estructural** ya que la **cal hidratada** empleada busca estabilizar el suelo limo arcilloso y por esa razón se denominó de esa manera.

La cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos, en varios grados o cantidades, dependiendo del objetivo. Una mínima cantidad de cal para tratamiento se utiliza para secar y modificar temporalmente los suelos. Tal tratamiento produce una plataforma de trabajo para la construcción de caminos temporales. Un mayor grado de tratamiento – respaldado por las pruebas, diseño y las técnicas apropiadas de construcción – producen la estabilización estructural permanente del suelo. Para el tratamiento de suelos se puede utilizar cal viva (óxido de calcio – CaO) o cal hidratada (hidróxido de calcio – Ca [OH]₂). (LIME, 2004)

La cal busca reducir la plasticidad del suelo y que las características relativas a estabilidad y durabilidad sean suficientes. Provoca en los suelos limo arcilloso una notable disminución de plasticidad. Entrega mayor trabajabilidad en las operaciones de construcción. Aporta buenas superficies de trabajo para los equipos de construcción. Tiene definidas aplicaciones en el campo vial. Modifica características indeseables y perjudiciales de los suelos limo arcilloso y tiene una lenta pero gradual ganancia de resistencia. (Álvarez– ICPC, 2010)

2.2.2. Subrasante - Suelo

La subrasante es la capa superficial, de terreno natural. Para construcción de caminos se analizará hasta 0.45 m de espesor. Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño del pavimento. Se identificarán cinco categorías de subrasante:

S0: Subrasante muy pobre CBR < 3%

S1: Subrasante pobre CBR = 3% - 5%

S2: Subrasante regular CBR = 6 - 10%

S3: Subrasante buena CBR = 11 - 19%

S4: Subrasante muy buena CBR > 20%

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor se procederá a eliminar esa capa de material inadecuado y se colocará un material granular con CBR mayor a 6%; para su estabilización. (MTC, 2008)

2.2.2.1. Tipos de suelo: clasificación AASHTO

En esta clasificación los suelos se clasifican en siete grupos (A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7), según su granulometría y plasticidad. Estos siete grupos se corresponden a dos grandes categorías de suelos, suelos granulares (con no más del 35% que pasa por el tamiz nº 200) y suelos limo-arcillosos (más del 35% que pasa por el tamiz nº 200). Los grupos incluidos por los suelos granulares son los siguientes:

- A-1: Corresponde a una mezcla bien graduada de gravas, arenas (gruesa y fina) y finos no plásticos o muy plásticos. También se incluyen en este grupo las mezclas bien graduadas de gravas y arenas sin finos.
- A-1-a: Incluye los suelos con predominio de gravas, con o sin material fino bien graduado

- A-1-b: Incluye suelos constituidos principalmente por arenas gruesas, con o sin material fino bien graduado.

- A-3: Corresponde, típicamente, a suelos constituidos por arena fina de playa o de duna, de origen eólico, sin finos limosos o arcillosos o con una pequeña cantidad de limo no plástico. También incluyen este grupo, los depósitos fluviales de arena fina mal graduada con pequeñas cantidades de arena gruesa o grava.

- A-2: Este grupo comprende a todos los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz nº 200 y que no pueden ser clasificados en los grupos A-1 y A-3, debido a que el porcentaje de finos o la plasticidad de estos (o ambas cosas) están por encima de los límites fijados para dichos grupos. Por todo esto, este grupo contiene una gran variedad de suelos granulares que estarán entre los correspondientes a los grupos A-1 y A-3 y a los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

- A-2-4 y A-2-5: En estos subgrupos se incluyen los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz nº 200 y cuya fracción que pasa por el tamiz nº 40 tiene las características de los grupos A-4 y A-5, de suelos limosos. En estos subgrupos están incluidos los suelos compuestos por grava y arena gruesa con contenidos de limo o índices de plasticidad por encima de las limitaciones del grupo A-1, y los suelos compuestos por arena fina con una proporción de limo no plástico que excede la limitación del grupo A-3.

- La categoría de los suelos limo-arcillosos está compuesta por los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, cuyo comportamiento en explanadas va de regular a malo. En esta categoría los suelos se clasifican en los distintos grupos atendiendo únicamente a su límite líquido y a su índice de plasticidad.

Además según la norma ASTM D653 indica la terminología para 7 tipos de suelo los cuales son:

1. Arena fina: partículas de roca y suelo que pasan el tamiz #40 (425 μm) y son retenidos en un tamiz de 75 μm (#200)

2. Arena gruesa: partículas de roca o de suelo que pasan el tamiz 2mm (#10) y son retenidos en un tamiz de 425 µm (#40)
3. Cantos: fragmentos de roca, usualmente redondeados por abrasión, que son retenidos en un tamiz de 7.5 cm
4. Grava: partículas de roca que pasan por un tamiz 7.5 cm y son retenidos en un tamiz de 2mm (#10)
5. Material limoarcilloso: partículas finas de suelo y de roca que pasan por un tamiz de 75 µm (#200)
6. Limoso: material finogranular que tiene un índice de plasticidad $< o = a$ 10
7. Arcilloso: material finogranular que tiene un índice de plasticidad $< o = a$ 11

La Clasificación ASTM establece el límite del 50% de material que pasa por el tamiz nº 200 para separar los suelos granulares de los suelos de grano fino, el 35% establecido por la clasificación AASHTO es más realista. Al basarse ambos sistemas en los ensayos, resulta interesante utilizarlos de forma simultánea para tener así una clasificación más completa del suelo. A continuación se presenta una correlación de los dos sistemas de clasificación más difundido, AASHTO y ASTM:

Tabla N°1: Correlación entre el sistema AASHTO y ASTM

Clasificación de Suelos AASHTO	Clasificación de Suelos ASTM
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A - 2	GM, GC, SM, SC
A - 3	SP
A - 4	CL, ML
A - 5	ML, MH, CH
A - 6	CL, CH
A - 7	OH, MH, CH

Fuente: US Army Corps of Engineers – MTC, 2005

Tabla N°2: Clasificación de suelos – Método AASHTO

Clasificación general	Suelos granulosos 35% máximo que pasa por tamiz de 0,08mm							Suelos finos más de 35% pasa po el tamiz de 0.08 mm				
Grupo	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
Simbolo	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6
Analisis granulométrico												
%% que pasa por el tamiz												
2 mm	máx.50											
0.5 mm	máx.30	máx.50	máx.50									
0.08 mm	máx.15	máx.25	máx.10	máx.3 5	máx.3 5	máx.3 5	máx.3 5	mín.3 5	mín.3 5	mín.3 5	mín.35	mín.35
Limites Atterberg				máx.4 0	min.4 0	máx.4 0	min.4 0	máx.4 0	máx.4 0	máx.4 0	min.40	min.40
Límite de liquidez índice de plasticidad	máx.6	máx.6		máx.1 0	máx.1 0	min.1 0	min.1 0	máx.1 0	máx.1 0	min.1 0	min.10 IP<LL-30	min.10 IP<LL-30
Índice de grupo	0	0	0	0	0	máx.4	máx.4	máx.8	máx.1 2	máx.1 6	máx.20	máx.20
Tipo de material	Piedras, gravas y arena		Arena Fina	Gravas y arenas limosas y arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcilloso		
Estimación general del suelo como subrasante	De excedente a bueno							De pasable a malo				

Fuente: MTC. 2008.

2.2.2.2. Tipos de suelo: clasificación SUCS

Tabla N°3: **CLASIFICACIÓN SUCS**

DIVISIONES MAYORES			SÍMBOLO DE GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN PARA SUELOS GRANULARES	
Suelos de grano grueso (más del 50% del material es mayor en tamaño que el tamiz n° 200)	Gravas (más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz N° 4)	Gravas Limpias (poco o ningún fino)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas poco o ningún fino	Cu>4 1 < Cc<3	
			GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava - arena, poco o ningún fino	No cumple todos los requisitos de gradación para Gw	
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	GM	Gravas limosas, mezcla grava - arena - limo	Límites de Atteberg por debajo de la línea A o $lp < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < lp < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo
			GC	Gravas arcillosas, mezcla grava - arena - arcillosas	Límites de Atteberg por encima de la línea A o $lp > 7$	
	Arenas (más de la mitad de la fracción gruesa es menor que el tamiz N°4)	Arenas Limpias (poco o ningún fino)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	Cu>6 1 < Cc<3	
			SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	No cumplen todos los requisitos de gradación para SW	
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	SM	Arenas limosas mezcla de arena - limo	Límites de Atteberg por debajo de la línea A o $lp < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < lp < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena - arcilla	Límites de Atteberg por encima de la línea A o $lp > 7$	

DIVISIONES MAYORES		SÍMBOLO DE GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN PARA SUELOS GRANULARES
Suelos de grano fino (más del 50% del material pasa el tamiz n° 200)	Limos y arcillas (Límite líquido $w_l < 50$)	ML	Limos inorgánicos y arena muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad	1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva granulométrica. 2. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el tamiz N° 200 los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% - GW, GP, SW, SP
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras.	
		OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
	Limos y arcillas (Límite líquido $w_l > 50$)	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos.	CARTA DE PLASTICIDAD
		CH	Arcillas orgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.	
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos	
	Suelos Altamente orgánicos	Pt	Turba u otros suelos altamente orgánicos	

Fuente: LMS-FIC-UNI, 2006

2.2.2.3. Ensayos de laboratorio

A. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MEDIANTE TAMIZADO POR LAVADO - NORMA ASTM D422

1. Descripción

Este método fija el modo de obtener mediante el tamizado la distribución de las partículas por tamaño en cada malla, en una muestra, sirve para determinar su clasificación y según esto su uso más adecuado.

2. Equipos y herramientas

- Balanza digital de precisión 0.1 gr.
- Horno eléctrico de temperatura hasta 110°C +- 5°C.
- Juego de tamices: 3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 8, N°10, N°16, N°20, N°30, N°40, N°50, N°60, N°100, N°200, tapa y fondo de acuerdo a la norma ASTM E011.
- Bandejas metálicas
- Cuarteador mecánico
- Lona para cuarteo en campo.
- Equipo complementario: Cucharón, brocha, pico, palana, escobillas de fierro, recipientes vacíos, sacos de polietileno

3. Personal

- Técnico de Laboratorio
- Tesista

4. Procedimiento

- Tomar la cantidad de la muestra más representativa en campo, dependiendo del tamaño máximo del suelo a ensayar de acuerdo a la Norma ASTM D75. Realizar el método del cuarteo en campo si es necesario.
- Colocar la muestra dentro de los sacos de polietileno para su traslado a laboratorio.

- Pesar la muestra con su humedad natural con una precisión de 0.1 gr.
- Colocar a secar la muestra en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ o $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas o hasta que la muestra tenga un peso constante.
- Retirar la muestra y dejar enfriar al ambiente.
- Pesar la muestra seca con una precisión de 0.1 gr.
- Lavar la muestra ejerciendo presión suave con los dedos y utilizando escobilla de fierro para liberar las partículas arcillosas adheridas a las partículas más gruesas.
- Toda el agua proveniente del lavado será colada por la malla N°200.
- Continuar con el lavado hasta que el agua sea transparente.
- Colocar a secar la muestra lavada en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm$ hasta que la muestra tenga un peso constante, incluyendo todas las partículas retenidas en la malla N° 200.
- Retirar la muestra y dejar enfriar al ambiente.
- Pesar la muestra seca con una precisión de 0.1 gr.
- Colocar el juego de tamices desde el tamaño máximo del agregado hasta el tamiz N° 4 en orden descendente, colocar la tapa y fondo. Tamizar la muestra seca.
- Pesar las partículas retenidas en cada tamiz con una precisión de 0.1 gr.
- Colocar el juego desde el tamiz N° 8 hasta el tamiz N° 200 en orden descendente, colocar la tapa y fondo.
- Tamizar las partículas retenidas en el plato pasante el tamiz N° 4 del tamizado anterior.
- Pesar las partículas retenidas en cada tamiz con una precisión de 0.1 gr.
- El tamizado se hará manual o mediante un equipo (tamizador eléctrico). El tamizado manual se realizará con movimientos giratorios laterales y verticales, en

ningún caso se debe forzar con los dedos las partículas a pasar al tamiz siguiente, y se considerará suficiente el tamizado cuando más del 1% de la masa no pasa en un minuto al tamiz siguiente.

- Pesar las partículas retenidas en cada tamiz con una precisión de 0.1 gr.
- Registrar y procesar datos con una precisión de 0.1%.

B. LÍMITES DE ATTERBERG - NORMA ASTM D4318

1. Descripción

El **Límite Líquido** de un suelo está definido como el contenido de agua expresado en porcentaje del peso suelo secado al horno, cuando el suelo se encuentra en el límite entre los estados plásticos y líquidos. El contenido de agua en este límite, se define como la humedad necesaria para que el surco separador de las dos mitades de una pasta de suelo, se cierre a lo largo de su fondo en una distancia de 13mm cuando se deja caer la cuchara 25 veces desde una altura de 1 cm. a una velocidad de dos golpes por segundo.

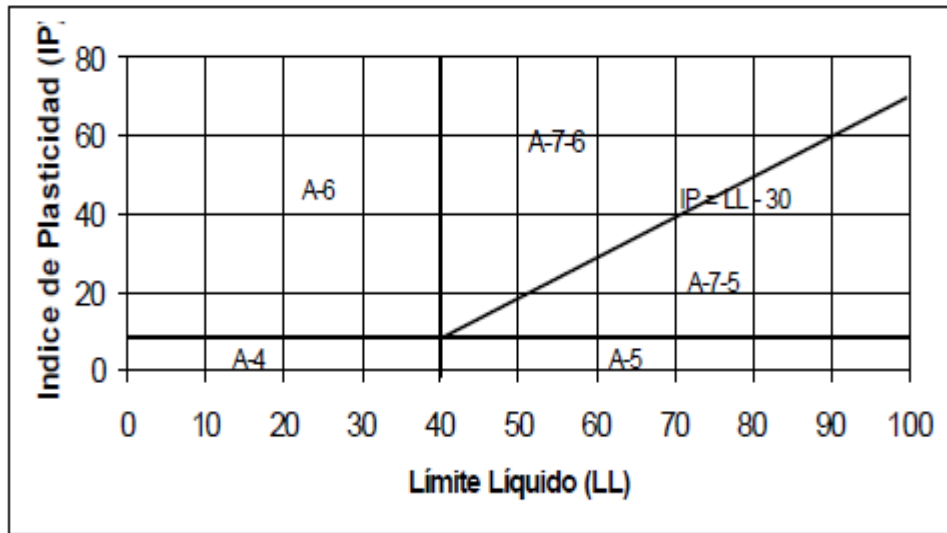
El **Límite Plástico** de un suelo está definido como el contenido de agua expresado en porcentaje del peso del suelo secado al horno, cuando en suelo se encuentra en el límite entre los estados plásticos y semisólidos. El contenido de agua en este límite, se define como el contenido más bajo de agua al cual el suelo puede ser rolando en hilos de 3.2 mm. (1/8") y se rompe en pedazos.

1. Límite líquido: contenido de humedad que hace que una ranura se cierre en 25 golpes.
2. Límite plástico: máxima humedad con la que se puede hacer un cilindro de 3 mm de diámetro.
3. Límite de encogimiento: al secar el suelo no hay pérdida de volumen, se reconoce por cambio de color.

Índice de plasticidad

$$IP = LI - LP \dots\dots\dots (Ec.2)$$

(Jorge a. Álvarez Pabón – ICPC, 2010)



Fuente: LMS-FIC-UNI, 2006: Carta de plasticidad - AASTHO

Este ensayo, permite conocer cualitativamente el comportamiento de un suelo en función de su humedad con lo cual se podrá trabajar un suelo de forma tal que éste sea capaz de resistir solicitaciones, deformándose sin fallar. (Hoyos, M. 2006)

Tabla N°4: Características de suelos según sus Índices de plasticidad

INDICE DE PLASTICIDAD	CARACTERÍSTICAS
IP > 20	Suelos muy arcillosos
20 > IP > 10	Suelos arcillosos
10 > IP > 4	Suelos pocos arcillosos
IP = 0	Suelos exentos de arcillas

FUENTE: MTC, 2008

Índice de Grupo (IG):

Es un índice adoptado por AASHTO de uso corriente para clasificar suelos, está basado en gran parte en los límites de Atterberg.

El índice de grupo de un suelo se define mediante la fórmula:

$$IG = 0.2 (a) + 0.005 (ac) + 0.01 (bd) \dots \dots \dots (Ec.3)$$

Dónde:

a = F - 35 (F = Fracción del porcentaje que pasa el tamiz 200 -74 micras).
Expresado por un número entero positivo comprendido entre 1 y 40.

b = F - 15 (F = Fracción del porcentaje que pasa el tamiz 200 -74 micras).
Expresado por un número entero positivo comprendido entre 1 y 40.

c = LL - 40 (LL = límite líquido). Expresado por un número entero comprendido entre 0 y 20.

d = IP-10 (IP = índice plástico). Expresado por un número entero comprendido entre 0 y 20 o más.

El índice de grupo es un valor entero positivo, comprendido entre 0 y 20 o más. Cuando el IG calculado es negativo, se reporta como cero.

Un índice cero significa un suelo muy bueno y un índice igual o mayor a 20, un suelo no utilizable para carreteras.

Si el suelo de subrasante tiene:

Tabla N°5: Índice de grupo

INDICE DE PLASTICIDAD	CARACTERÍSTICAS
IG > 9	Muy pobre
IG está entre 4 a 9	Pobre
IG está entre 2 a 4	Regular
IG está entre 1 a 2	Bueno
IG está entre 0 a 1	Muy Bueno

FUENTE: MTC, 2008

2. Equipos y herramientas

- Balanza digital de precisión 0.01 gr.
- Horno eléctrico de temperatura hasta 110 °C +- 5 °C.
- Tamiz N° 40
- Para Limite Líquido: Copa de Casagrande, ranuradores, espátula.
- Para Límite Plástico: Vidrio esmerilado, espátula.
- Cápsulas de aluminio y porcelana.

3. Personal

- Técnico de Laboratorio
- Tesista

4. Procedimiento

4.1 Limite Líquido

- El material obtenido se secará a una temperatura no mayor a 60°C o secado a temperatura ambiente según norma ASTM 4318 Sección 10.2.1.
- Cuando la muestra esté seca se tamizará por la malla N°40 y se obtendrá 200 gr. para el ensayo.

- El material se satura con agua potable en una cápsula de porcelana por un periodo mínimo de tiempo de 16 horas.
- Pasado las 16 horas se procederá al batido de material (mezclado) por un periodo de 30 minutos si es que el material es bastante arcilloso, si el material es arenoso, no necesitara de este tiempo.
- Se verificará la calibración de la Copa de Casagrande (altura de caída libre de la cazueleta), que esté de acuerdo a norma (1 cm.).
- Terminado el mezclado se procederá al ensayo del límite líquido: colocar la pasta en la cuchara de la Copa Casagrande, mezclar la muestra y pulirla utilizando la espátula. Pasar el ranurador dividiendo la pasta en dos mitades iguales.
- Dejar caer la cuchara desde una altura de 1cm a una velocidad de dos golpes por segundo hasta que se cierre una distancia de 13 mm. Este proceso se repetirá para obtener los tres valores de interpolación en el gráfico Contenido de Humedad vs. N° de golpes.
- Se procederá a pesar la muestra húmeda ensayada con una precisión de 0.01 gr.
- Colocar la muestra a secar en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$ por el tiempo que sea necesario, hasta obtener un peso constante.

4.1 Limite Plástico

- Se obtendrá una muestra para límite plástico de unos 20 gramos.
- Se hará perder un poco de humedad con las manos si es que la muestra esta muy saturada.
- Cuando la muestra se nota aparentemente bien, se hará bolitas de unos 2 gr. cada una, luego después se procederá al rolado con los dedos sobre el vidrio esmerilado haciendo hilos a una velocidad de 80 a 90 ciclos por minuto, este rolado

se realizará hasta que el diámetro del suelo rolado tenga 1/8" de pulgada (3.2 mm.) de grosor y este se rompa en pedazos en un tiempo no mayor a 2 minutos por cada bolita ensayada.

- Se tomarán dos muestras en cápsulas de aluminio y cada una tendrá un peso como mínimo de 6 gr. de suelo húmedo, según la sección 16.1 @ 16.6 de la norma.
- Se pesará la muestra húmeda con una precisión de 0.01 gr.
- Se colocará a secar la muestra en el horno a una temperatura de 110 °C + 5°C por el tiempo que sea necesario, hasta obtener un peso constante.
- Retirar las muestras del horno: límite líquido y límite plástico, y dejar a enfriar al ambiente. Se debe de tener en cuenta de no dejar mucho tiempo en el ambiente para evitar la absorción de la humedad giroscópica.
- Pesar las muestras secas ensayadas con una precisión de 0.01 gr.
- Registrar y procesar datos con una precisión de 0.01%.

C. PROCTOR ESTANDAR Y PROCTOR MODIFICADO - ASTM D 698 Y ASTM D 1557

1. Descripción

Se entiende por compactación todo proceso que aumenta el peso volumétrico de un suelo. En general es conveniente compactar un suelo para incrementar su resistencia al esfuerzo cortante, reducir su compresibilidad y hacerlo más impermeable. (Montejo, F. 2001)

$$D_s = \frac{D_h}{\left(1 + \frac{W\%}{100}\right)} \quad \dots\dots \dots (Ec.4)$$

Dónde:

- Ds: Densidad seca.
- Dh: Densidad húmeda.
- W%: Contenido de humedad.

El Proctor Estándar y Proctor Modificado determinan la relación de densidad y humedad de un suelo en particular, aplicando un esfuerzo a través de una energía específica de compactación mediante la caída de un pisón cilíndrico de una altura de 12" y 18", dentro de un molde cilíndrico de 4" y 6" de diámetro.

2. Equipos y herramientas

- Balanza digital de 20 Kg. con una precisión de 0.1 gr.
- Horno eléctrico capaz de mantener una temperatura hasta 110°C +- 5°C
- Molde para Proctor Modificado.
- Pisón de operación manual de sección circular con un peso de 4.54 Kg. para Proctor Modificado.
- Mallas de ¾", 3/8", N° 4
- Equipo complementario: Espátulas, regla metálica, bandeja, probeta graduada de 1 litro, martillo de goma, badilejo, cucharón, bolsas plásticas, recipientes vacíos.

3. Personal

- Técnico de Laboratorio
- Tesista

4. Procedimiento

- Primero debe verificarse el análisis granulométrico para ver cuál de los métodos es aplicable según Tabla N°5.

Tabla N° 6: Resumen Ensayo Proctor Estándar y Proctor Modificado

TIPO DE ENSAYO	PROCTOR ESTÁNDAR ASTM D698 - 91(98)			PROCTOR MODIFICADO ASTM D1557 - 91(98)		
METODO	A	B	C	A	B	C
CONDICIONES PARA ELECCION DEL METODO	% RET. ACUM. N° 4 <= 20%	% RET. ACUM. N° 3/8 <= 20%	% RET. ACUM. N° 3/4 <= 30%	% RET. ACUM. N° 4 <= 20%	% RET. ACUM. N° 3/8 <= 20%	% RET. ACUM. N° 3/4 <= 30%
		% RET. ACUM. N° 4 > 20%	% RET. ACUM. N° 3/8 > 20%		% RET. ACUM. N° 4 > 20%	% RET. ACUM. N° 3/8 > 20%
TIPO DE MATERIAL A UTILIZARCE	Tamiz por la malla N° 4	Tamiz por la malla N° 3/8	Tamiz por la malla N° 3/4	Tamiz por la malla N° 4	Tamiz por la malla N° 3/8	Tamiz por la malla N° 3/4
N° DE CAPAS (n)	3	3	3	5	5	5
N° DE GOLPES (N)	25	25	56	25	25	56
DIAMETRO DEL MOLDE (cm)	10.16 (+/-)0.04	10.16 (+/-)0.04	15.24 (+/-)0.07	10.16 (+/-)0.04	10.16 (+/-)0.04	15.24 (+/-)0.07
ALTURA DEL MOLDE (cm)	11.64(+/-)0.05	11.64(+/-)0.05	11.64(+/-)0.05	11.64(+/-)0.05	11.64(+/-)0.05	11.64(+/-)0.05
VOLUMEN DEL MOLDE (V) (cc)	944(+/-)14	944(+/-)14	2124(+/-)25	944(+/-)14	944(+/-)14	2124(+/-)25
PESO DEL MARTILLO (W) (kg)	2.5(+/-)0.01	2.5(+/-)0.01	2.5(+/-)0.01	4.54(+/-)0.01	4.54(+/-)0.01	4.54(+/-)0.01
ALTURA CAIDA DEL MARTILLO (h) (cm)	30.48(+/-)0.13	30.48(+/-)0.13	30.48(+/-)0.13	45.72(+/-)0.16	45.72(+/-)0.16	45.72(+/-)0.16
DIAMETRO DEL MARTILLO (cm)	5.080(+/-)0.025	5.080(+/-)0.025	5.080(+/-)0.025	5.080(+/-)0.025	5.080(+/-)0.025	5.080(+/-)0.025
ENERGIA ESPECIFICA DE COMPACTACION	6.054	6.054	6.054	6.027	27.485	27.485
OBSERVACIONES:	CORREGIR EL OPTIMO DE HUMEDAD Y LA MAXIMA DENSIDAD SECA OBTENIDA, UTILIZANDO EL METODO ASTM D4718					
NOTA:	CUANDO MAS DEL 5% DE LA MUESTRA TOTAL ES RETENIDO SOBRE LA MALLA N° 4, SE HARA LA CORRECCION POR ESTA NORMA					

Fuente: ASTM D698 y ASTM D1557, 1998

- Dependiendo el método se procederá a tamizarse por la malla correspondiente hasta obtener un peso húmedo aproximad de 24 Kg. para Proctor estándar y 35 Kg. para Proctor Modificado.

- El material a ensayarse debe de estar por debajo del contenido óptimo de humedad.
- Si es necesario, secar el material al medio ambiente ó empleando un horno a una temperatura que no exceda los 60°C, hasta hacerlo manejable.
- Incrementar la cantidad de agua al material gradualmente a cada punto de 2 en 2 % hasta encontrar el contenido óptimo de humedad. En ningún caso los incrementos serán mayores al 4% según la Sección 10.2.1 de la norma ASTM D 698.
- Luego colocar el material dentro de bolsas plásticas y sellarlas.
- El tiempo de saturación del material dependerá del tipo de suelo. Para este estudio será de 16h.
- Cumplido el tiempo mínimo de saturación se procederá a ensayar los especímenes. Si se trata de Proctor Estándar el material se dividirá en tres porciones y si se trata de Proctor Modificado en cinco porciones.
- Colocar el molde seleccionado sobre una base rígida horizontal nivelada.
- Colocar el material con el cucharón dentro del molde seleccionado nivelando con la mano, colocar el pisón de compactación sobre la porción vertida en el molde (primera capa) y luego levantar el mango hasta que el pisón llegue al extremo de la guía y se deja caer sobre la porción (1 golpe). El tubo de guía debe sostenerse firme y verticalmente con una desviación máxima de 5° con la vertical. El espesor compactado será de 1" (2.54 cm.). Los golpes serán aplicados a una velocidad uniforme sobre toda la superficie de la porción en el molde no excediéndose aproximadamente de 1.4 segundos por golpe.
- Retirar el pisón del molde y colocar una nueva capa, compactar de la misma manera como se indicó anteriormente, continuando de este modo hasta completar las tres o cinco capas requeridas. El número de golpes sobre cada capa está en

función del método seleccionado. Es necesario que cuando se haya terminado la compactación de todas las capas la muestra no exceda de 6mm al tope del molde, esto con el fin de permitir un enrasamiento adecuado de la muestra compactada.

- Una vez retirado el collarín del molde los posibles vacíos que se forman en la superficie de enrasamiento pueden ser rellenados con material fino.
- Retirar el material suelto de los bordes del molde y pesar el espécimen con una precisión de 1 gr.
- Obtener la densidad húmeda con una precisión de 0.001 gr./cm³.
- Remover, mezclar y homogenizar el material compactado que se encuentra dentro del molde para obtener el contenido de humedad.
- Pesar el material húmedo para determinar el contenido de humedad con una precisión de 0.1 gr.
- Colocar el material a secar en el horno a una temperatura de 110°C + 5°C hasta obtener un peso constante
- Retirar el material del horno, y dejar enfriar al medio ambiente por el espacio de 25 minutos aprox.
- Pesar la muestra seca con una precisión de 0.1 gr.
- Repetir los pasos para los 4 especímenes.
- Si es necesario, efectuar la corrección por sobretamaño de acuerdo a la Tabla 5 Resumen Ensayo Proctor Estándar y Proctor Modificado.
- Registrar y procesar datos.

D. CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) - ASTM D1883 / NTP 339.145

1. Descripción

El ensayo de C.B.R. es el más empleado para el diseño de pavimentos, y mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas.

$$C.B.R. = 100 \times \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{\text{Carga Unitaria Patrón}} \dots\dots (Ec.5)$$

El ensayo CBR (California Bearing Ratio) mide la carga necesaria para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra compactada de suelo después de haberla sumergido en agua durante cuatro días y de haber medido su hinchamiento.

El hecho de sumergir la muestra se debe a que así podemos prever la hipotética situación de acumulación de humedad en el suelo después de la construcción. Por tanto después de haber compactado el suelo y de haberlo sumergido, lo penetramos con un pistón el cual va conectado a un pequeño "plotter" que nos genera una gráfica donde se nos representa la carga respecto la profundidad a la que ha penetrado el pistón dentro de la muestra.

2. Equipos y herramientas

- Equipo CBR (3 moldes cilíndricos con placa de base y collar de extensión, 3 discos espaciadores, 3 placas de expansión, 3 sobrecargas cada una de 4.5 kg de peso y 3 trípodes.
- Pisón proctor modificado.
- Balanza con precisión de 1 gr.
- 3 diales de expansión.
- Estufa con control de temperatura.
- Probeta de 1000 ml.
- Recipiente de 6kg de capacidad.

- Espátula.
- Taras idénticas.

3. Material

- Muestra alterada seca
- Papel filtro

4. Personal

- Técnico de Laboratorio
- Tesista

5. Procedimiento

Donde este procedimiento consta de 3 fases:

5.1. Ensayo de compactación CBR (determinación de la densidad y húmeda del suelo)

- Preparar la muestra con el contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo de compactación proctor modificado.
- Compactar la muestra con 5 capas en cada uno de los 3 moldes CBR, el primero con 13 golpes, el segundo con 27 golpes y el tercero con 56 golpes por capa.
- Determinar la densidad húmeda y el contenido de humedad de las muestras en cada molde.
- Determinar la densidad seca de las muestras de cada molde.

5.2 Ensayo de hinchamiento (determinación de las propiedades expansivas del material)

- Invertir las muestras de tal manera que la superficie libre quede en la parte superior cuando se ensambla nuevamente los moldes en sus placas de base.

- Colocar sobre cada muestra el papel filtro, la placa de expansión, la sobrecarga, el trípode y el dial de expansión.
- Colocar los tres moldes debidamente equipados en un tanque de agua durante días (96 horas), registrar las lecturas de expansión cada 24 horas.

5.3 Ensayo carga – penetración (determinación de la resistencia a la penetración)

- Después de los 4 días sacar los moldes del tanque de agua y de cada uno de ellos retirar el dial, el trípode, la sobrecarga y la placa de expansión, dejarlos drenar durante 15 minutos.
- Colocar la sobrecarga en cada molde, llevar a la prensa hidráulica, proceder al ensayo de penetración aplicando un pisón a una velocidad de 0.05 pulga/min, registrar las lecturas de carga de cada muestra en las siguientes lecturas de penetración.

Tabla Nº 7: Lecturas de penetración - CBR

Lecturas de penetración	
Pulgadas	Milímetros
0.000	0.000
0.025	0.640
0.050	1.270
0.075	1.910
0.100	2.540
0.125	3.180
0.150	3.810
0.175	4.450
0.200	5.080
0.250	6.350
0.300	7.620
0.350	8.890
0.400	10.160
0.450	11.430
0.500	12.700

Fuente: Elaboración propia, 2015

2.2.3. Estabilización del suelo con cal

La estabilización del suelo cambia considerablemente las características del mismo, produciendo resistencia y estabilidad a largo plazo, en forma permanente, en particular en lo que concierne a la acción del agua. La cal, sola o en combinación con otros materiales, puede ser utilizada para tratar una gama de tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán. En general, los suelos arcillosos de grano fino (con un mínimo del 25 por ciento que pasa el tamiz 200 $75\mu\text{m}$ - y un Índice de Plasticidad mayor que 10) se consideran buenos candidatos para la estabilización. (LIME, 2004)

Las condiciones del material a estabilizar son:

a. Granulometría (Agregados): La granulometría del material a estabilizar puede corresponder a los siguientes tipos de suelos A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7. Además el tamaño máximo no podrá ser mayor de 5 cm (2") o 1/3 del espesor de la capa compactada.

b. Plasticidad : La fracción inferior del tamiz de 425 μm (N.º 40) deberá presentar un Límite Líquido inferior a 40 y un Índice Plástico comprendido entre 10 y 50%, determinados según normas de ensayo MTC E 110 y MTC E 111.

c. Composición Química: La proporción de sulfatos del suelo, expresada como SO_4 no podrá exceder de 0,2% en peso.

d. Abrasión: Si los materiales a estabilizar van a conformar capas estructurales, los agregados gruesos deben tener un desgaste a la abrasión (Máquina de Los Ángeles) MTC E 207 no mayor a 50%.

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%.

La cal que se use para la construcción de suelo-cal puede ser cal viva ó cal hidratada y debe satisfacer los requisitos establecidos en la Especificación AASHTO M-216 ó ASTM C-977.

El agua deberá ser limpia y estará libre de materia álcalis y otras sustancias deletéreas. Su pH, medido según norma NTP 339.073, deberá estar comprendido entre 5,5 y 8,0 y el contenido de sulfatos, expresado como $SO_4^{=}$ y determinado según norma NTP 339.074, no podrá ser superior a 3.000 ppm, determinado según la norma NTP 339.072. En general, se considera adecuada el agua potable y ella se podrá emplear sin necesidad de realizar ensayos de calificación antes indicados. (MTC– EG-2013)

2.3. Definición de términos básicos

El suelo natural: puede definirse, como el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra, que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales (material parental, clima, macro y microorganismos y topografía), actuando durante un determinado periodo. Es considerado también como un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera y con los estratos que están debajo de él, que influye en el clima y en el ciclo hidrológico del planeta, y que sirve como medio de crecimiento para diversos organismos. (SOCIEDAD AMERICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO, 1984)

Cal: Es el producto de calcinación de rocas carboníferas cálcico - magnésicas: creta, caliza, caliza dolomitizada, dolomita con no más del 8% de arcilla. El constituyente principal de la caliza es el carbonato de calcio.

Calicata: Perforación que se realiza en un terreno, con la finalidad de permitir la observación de los estratos del suelo a diferentes profundidades y eventualmente obtener muestras generalmente disturbadas. (ICG, 2000)

Subrasante: El suelo preparado para sostener una estructura o un sistema de pavimento. Es la fundación de la estructura del pavimento. El suelo de subrasante es llamado a veces suelo de fundación. (ICG, 2000)

Granulometría: Representa la distribución de los tamaños que posee el agregado mediante el tamizado según especificaciones técnicas. (MTC, 2008)

Análisis granulométrico o mecánico: Procedimiento para determinar la granulometría de un material o la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños. (MTC, 2008)

Tamiz: Aparato, en un laboratorio, usado para separar tamaños de material, y donde las aberturas son cuadradas. (ICG, 2000)

Límite líquido: Contenido de agua del suelo entre el estado plástico y el líquido de un suelo. (ICG, 2000)

Límite plástico: Contenido de agua de un suelo entre el estado plástico y el semi-sólido. (ICG, 2000)

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte. (MTC, 2013)

Arcillas: Partículas finas con tamaño de grano menor a $2 \mu\text{m}$ (0,002 mm) provenientes de la alteración física y química de rocas y minerales. (MTC, 2008)

Curva de compactación (curva de Proctor): Representación gráfica que relaciona el peso unitario seco (densidad) y el contenido de agua del suelo para un determinado esfuerzo de compactación. (MTC, 2008)

CBR (California Bearing Ratio): Valor relativo de soporte de un suelo o material, que se mide por la penetración de una fuerza dentro de una masa de suelo. (MTC, 2008)

Suelo arcilloso: Conformado por arcillas o con predominancia de éstas. Por lo general, no es adecuado para el tránsito vehicular. (MTC, 2008)

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2008)

Estabilización de suelos: Proceso físico y/o químico por el que se mejoran las propiedades físico- mecánicas del suelo natural en corte o de los materiales de préstamo en relleno, con el objeto de hacerlos estables. (NTECE0.10, 2010)

CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS

3.1. Formulación de la hipótesis

El uso de la cal estructural en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% incrementa la resistencia de la subrasante en el suelo limo arcilloso

3.2. Operacionalización de variables

- Resistencia de la subrasante
- Cal estructural

Tabla Nº 8: Operacionalización de variable

VARIABLES		Indicadores por Variable
Dependiente	Resistencia de la subrasante	Limite líquido Limite plástico Índice de plasticidad Optimo contenido de humedad Máxima densidad seca CBR al 0.1” CBR al 0.2”
Independiente	Cal estructural	Porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% del peso del material

Fuente: Elaboración propia, 2015

Tabla Nº 9: Matriz De Consistencia

TITULO	PROBLEMA	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	UNIDAD	INSTRUMENTOS
Determinación de la resistencia de la subrasante incorporando cal estructural en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de cajamarca, 2015	¿Cómo influye la cal estructural en la resistencia de la subrasante en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca, 2015?	El uso de la cal estructural en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% incrementa la resistencia de la subrasante de un limo suelo arcilloso	<u>DEPENDIENTE</u>	Límite líquido Límite plástico Índice de plasticidad	En porcentaje	Formatos de procesamiento de datos para los siguientes ensayos: - Análisis granulométrico - Límites de Atterberg - Proctor Modificado - CBR
			Resistencia de la subrasante	Óptimo contenido de humedad Máxima densidad seca CBR al 0.1" CBR al 0.2"	En porcentaje En gramos/centímetro cúbico En porcentaje	
			<u>INDEPENDIENTE</u> Cal estructural	Porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% del peso del material	En porcentaje	

Fuente: Elaboración propia, 2015

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Tipo de diseño de investigación.

Experimental.

4.2. Material de estudio.

4.2.1. Unidad de estudio.

Suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca

4.2.2. Población.

Sector 14 Mollepampa

4.2.3. Muestra.

Calle Jr. 23 de Septiembre (Ver anexo N° 1: Plano de ubicación)

4.3. Técnicas, procedimientos e instrumentos.

4.3.1. Para recolectar datos.

Primero: se escogió una calle del sector 14 Mollepampa, en esta investigación se opta por muestra por conveniencia seleccionada siendo la calle elegida el Jr. 23 de septiembre del sub-sector 6.

Segundo: se realizó el levantamiento topográfico para obtener el perfil del terreno en el cual se incorporará el perfil estratigráfico del suelo para una mejor comprensión del estudio incorporando también los estratos de las calicatas 1 y 2 con sus respectivos espesores. (Ver anexo N° 2: Perfil estratigráfico)

Tercero: en el suelo natural se obtuvo una muestra por debajo de los 40cm que se llevará al laboratorio para obtener su límite líquido y límite plástico en donde los valores obtenidos se verificaron con las condiciones

del material a estabilizar que nos brinda el MANUAL DE CARRETERAS – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN – EG-2013.

Cuarto: Una vez verificados los valores del límite líquido y límite plástico del suelo a estabilizar, se realizó las calicatas respectivas a 1.50m de profundidad donde se obtendrá las muestras para los ensayos de granulometría y límites de Atterberg para clasificar el suelo. Al tener la clasificación se procederá a realizar los ensayos de proctor modificado y CBR del suelo natural

Quinto: Se realizó los ensayos de límites de Atterberg, Proctor Modificado y CBR, a cada muestra de suelo natural incorporándole porcentajes de cal de 2%, 4%, 6% y 8%.

Séptimo: se comparó los resultados de los ensayos para obtener la respuesta a la hipótesis.

A continuación se presenta la recolección de datos en los siguientes formatos:

4.3.2. Para analizar información.

Para el procesamiento de datos se realizara de acuerdo a las siguientes normas:

- Para el ensayo análisis granulométrico se aplicara la norma ASTM D 422
- Para los ensayo límites de Atterberg se aplicara la norma ASTM D 4318
- Para el ensayo de proctor modificado se aplicara la norma ASTM D 1557
- Para el ensayo de CBR se aplicara la norma ASTM D 1883

A continuación se presenta los formatos de procesamiento de datos:

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

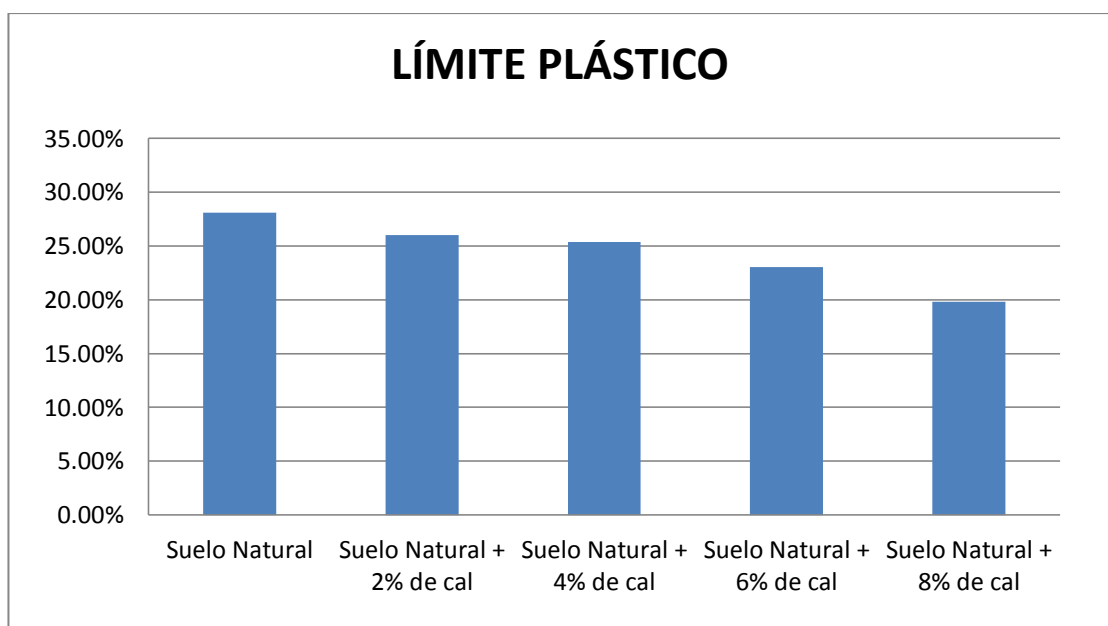
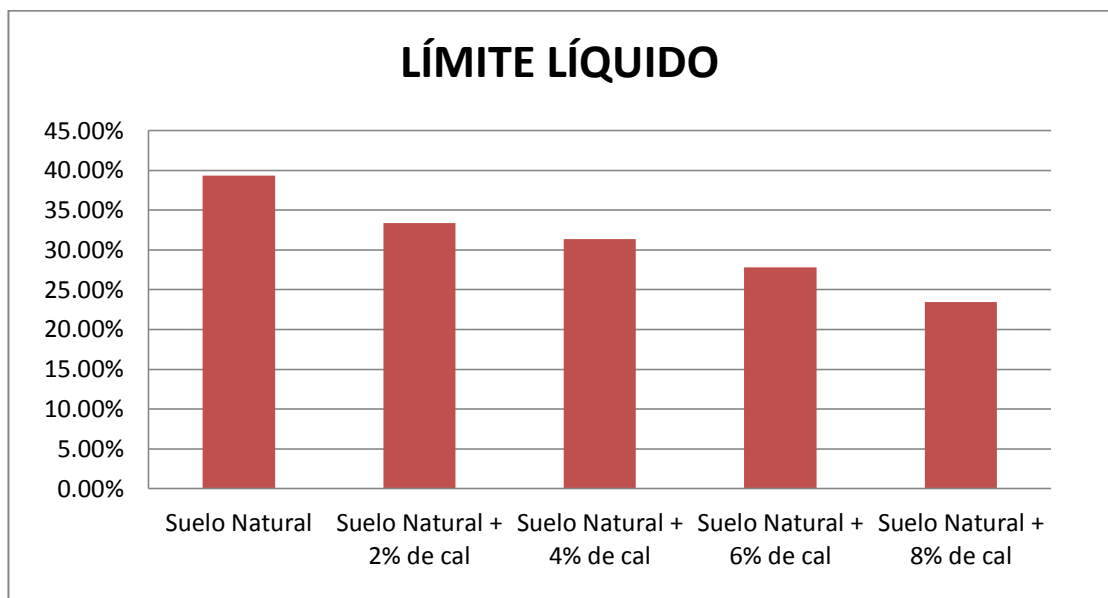
Después de haber culminado los ensayos de laboratorio y procesamiento de datos se realizó este cuadro comparativo de los ensayos realizados al suelo natural y al suelo con cal incorporado a diferentes porcentajes.

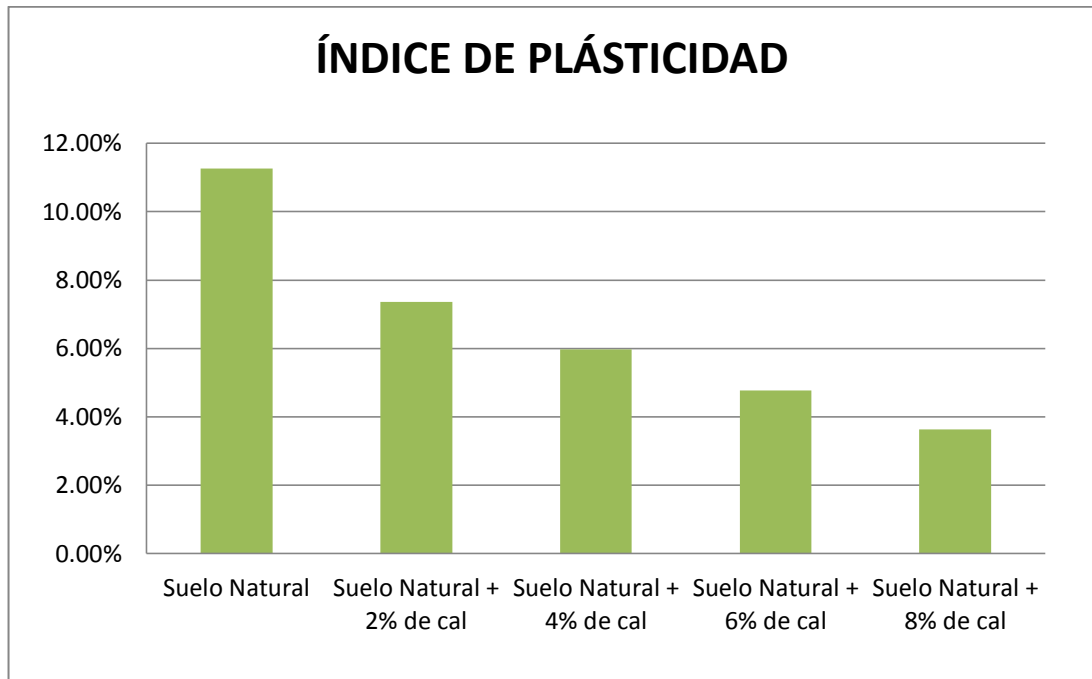
		Suelo Natural	Suelo Natural + 2% de Cal	Suelo Natural + 4% de Cal	Suelo Natural + 6% de Cal	Suelo Natural + 8% de Cal
LIMITES DE ATTERBERG	Límite líquido	39.36%	33.39%	31.37%	27.82%	23.45%
	Límite plástico	28.11%	26.03%	25.39%	23.03%	19.81%
	Índice de plasticidad	11.26%	7.37%	5.97%	4.78%	3.64%
PROCTOR MODIFICADO	Densidad max. Seca	1.898	1.929	1.95	1.96	1.98
	OCH	10.70%	12.90%	11.98%	11.95%	10.21%
CBR	CBR al 95% a 0.1"	5.20%	5.30%	6.30%	7.20%	8.05%
	CBR al 95% a 0.2"	5.40%	5.70%	6.60%	7.50%	8.30%

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

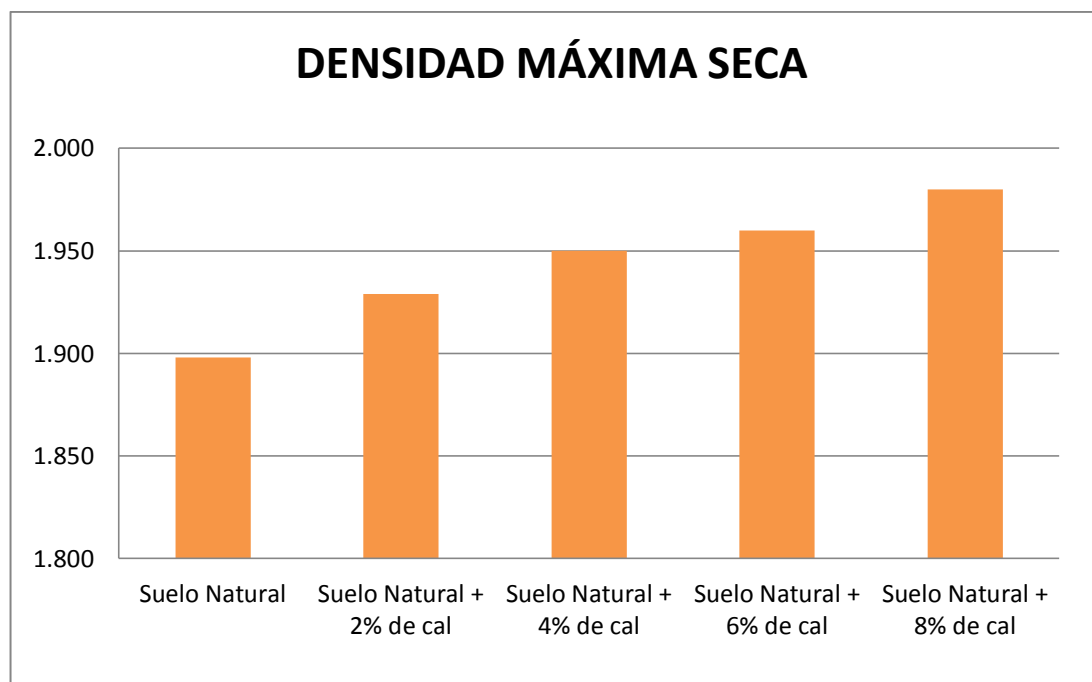
Al obtener los resultados de los ensayos puedo afirmar que el uso de la cal en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% incrementa la resistencia de la subrasante en un suelo limo arcilloso, ya que al observar el cuadro de resultados se considera también lo siguiente:

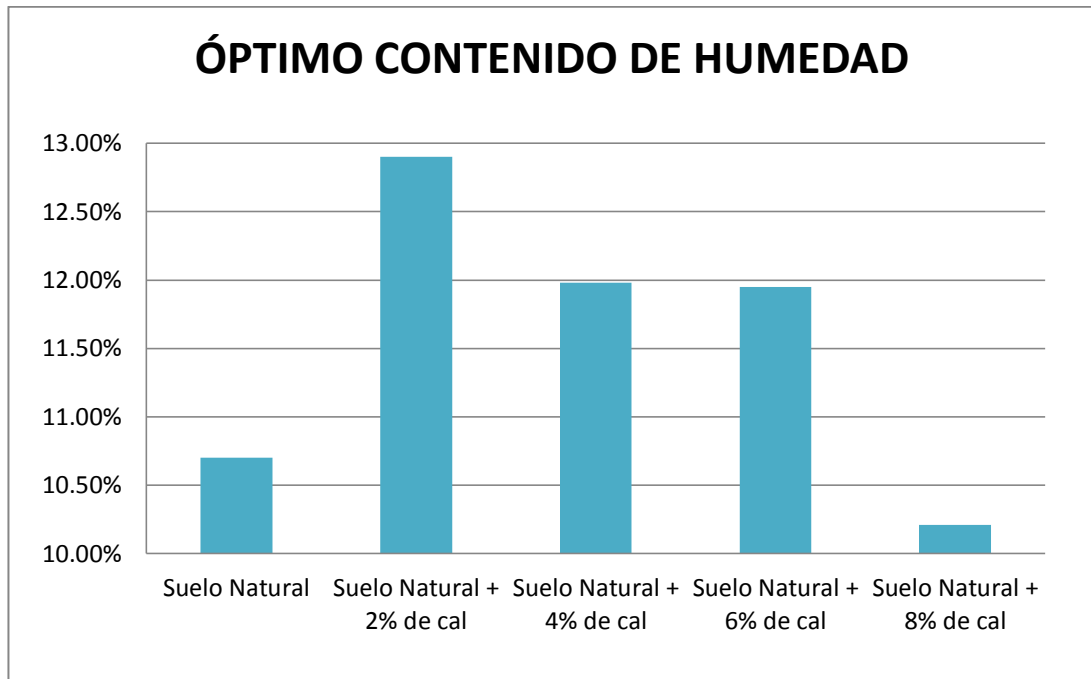
1. El límite líquido y límite plástico van disminuyendo al igual que los límites el índice de plasticidad. Así podemos observar en los siguientes gráficos



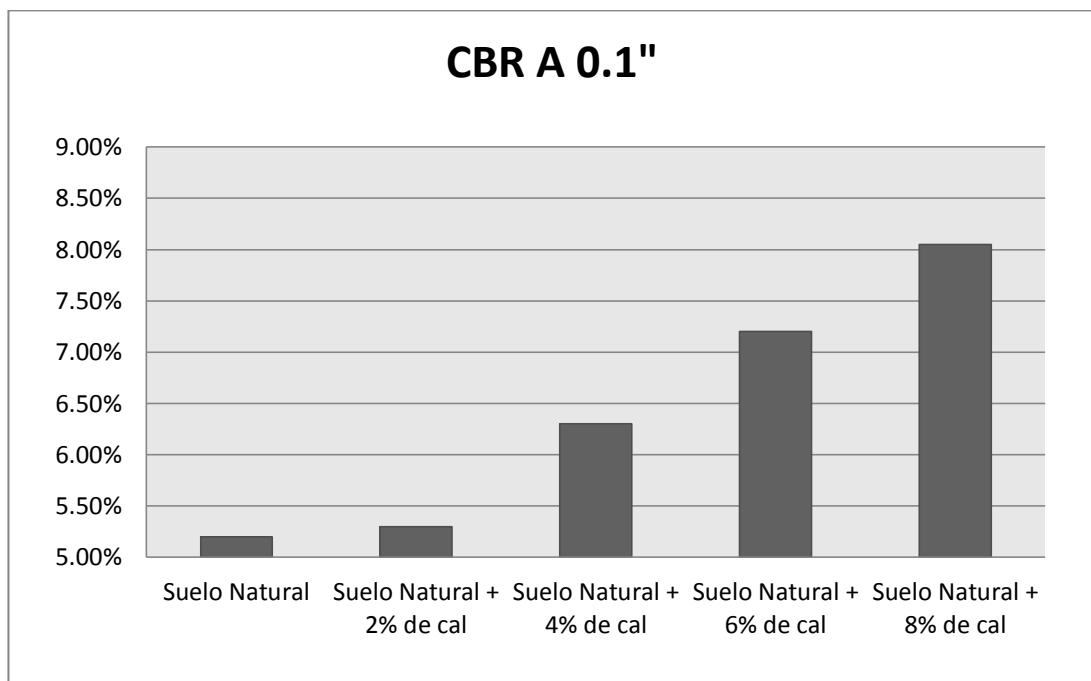


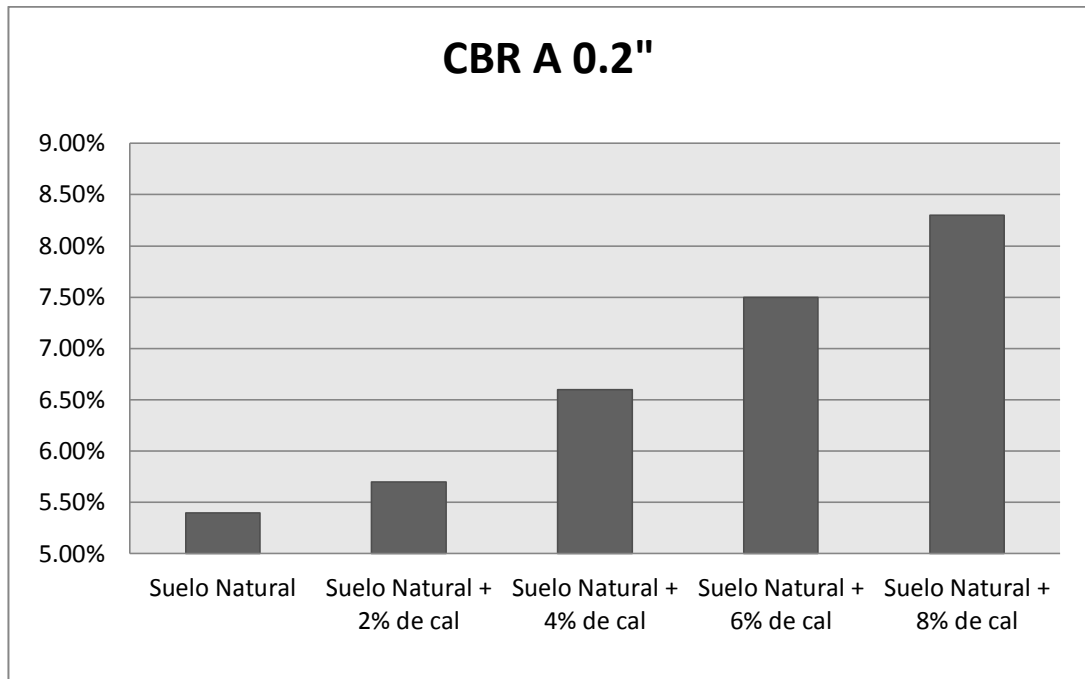
2. Al contrario de los resultados del ensayo de los límites de Atterberg, la densidad máxima seca va en aumento y el óptimo contenido de humedad muestra incremento pero al llegar al porcentaje de 4% de cal añadido el valor va bajando poco a poco.





3. El valor de CBR aumenta progresivamente a un 95% de la máxima densidad seca a 0.1" y 0.2" como se puede observar en las siguientes gráficas:





El valor de CBR del suelo natural es de 5.40% y con 8% de cal incorporado aumento a un valor de 8.30%; considerando lo que indica el Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, la subrasante considerada pobre al incorporarle cal se reconocería como una subrasante regular.

CONCLUSIONES

1. La hipótesis de esta investigación es verdadera, el uso de cal estructural en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% incrementa la resistencia de la subrasante en el suelo limo arcilloso.
2. Se determinó la resistencia de la subrasante limo arcillosa al incorporar cal estructural por medio del ensayo CBR, teniendo así el CBR al 0.1": con un suelo natural un CBR de 5.20%, incorporando 2% de cal un CBR de 5.30%, incorporando 4% de cal un CBR de 6.30%, incorporando 6% de cal un CBR de 7.20%, e incorporando 8% de cal un CBR de 8.05; CBR al 0.2": con un suelo natural un CBR de 5.40%, incorporando 2% de cal un CBR de 5.70%, incorporando 4% de cal un CBR de 6.60%, incorporando 6% de cal un CBR de 7.50%, e incorporando 8% de cal un CBR de 8.30%
3. Se determinó la variación del índice de plasticidad el cual fue disminuyendo al incorporarle mayor porcentaje de cal, teniendo así un índice de plasticidad: con un suelo natural un IP de 11.26%, incorporando 2% de cal un IP de 7.37%, incorporando 4% de cal un IP de 5.97%, incorporando 6% de cal un IP de 4.78% e incorporando 8% de cal un IP de 3.64%.
4. El uso de cal aumenta la resistencia de una subrasante limo arcilloso, aumenta su máxima densidad seca y disminuye su índice de plasticidad logrando así un suelo limo arcilloso mejorado.

RECOMENDACIONES

Al realizar los ensayos, éstos deben elaborarse en base a las normas ASTM y NTP de suelos, teniendo el debido cuidado de no alterar muestras.

El uso de los resultados de la presente tesis es únicamente para aquellos suelos que se indican en las bases teóricas.

Una investigación donde se utilice un porcentaje de cal mayor a 8% del peso del material a estabilizar.

Mapear sectores de la ciudad de Cajamarca en los que se puede aplicar cal hidratada a los porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% del peso de material de suelo.

REFERENCIAS

1. NTP 339.128 (1999) – Método de ensayo para el análisis granulométrico.
2. NTP 339.141 (1999) – Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada
3. NTP 339.145 (1999) – Método de ensayo de CBR (Relación de soporte de California) de suelos compactados en laboratorio
4. Manual de carreteras – especificaciones técnicas generales para la construcción – EG-2013.
5. Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2005)
6. Sociedad Americana De La Ciencia Del Suelo (1984)
7. MTC E 110 y MTC E 111. – Limites de Atterberg
8. Estabilización de suelos cohesivos con cal. Jaime David Vásquez Jara. (2008).
9. Breve resumen de Ingeniería Civil. Alberto Villarino Otero. (2012).
10. Taller básico de mecánica de suelos. Laboratorio de mecánica de suelos – Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería (LMS-FIC-UNI) (2006)
11. Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Asociación nacional de fabricantes de cales y derivados de España (ANCADE), Asociación nacional técnica de estabilizados de suelos y reciclado de firmes (ANTER) y Instituto Español del cemento y sus aplicaciones (IECA). (2008)
12. Estabilización de subrasantes. Jorge Álvarez Pabón – Instituto Colombiano de Productores de Cemento. (2010)
13. Estabilización de subrasante con cal. Rommel Fernando Angulo Trelles. (2004)
14. Manual de estabilización de suelo tratado con cal. LIME. (2004)

ANEXOS

ANEXO N.º 1. PLANO DE UBICACIÓN

ANEXO N.º 2. PERFIL ESTATIGRAFICO

ANEXO N.º 3. PANEL FOTOGRAFICO



FOTO 01: Retroexcavadora realizando la calicata en el Jr.
23 de Septiembre



FOTO 02: Identificando la primera calicata y determinando
su profundidad



FOTO 03: Retroexcavadora tapando la calicata



FOTO 04: Identificando la segunda calicata y determinando su profundidad



FOTO 05: Identificando la segunda calicata junto a mi asesor y determinando su profundidad



FOTO 06: Secando al aire la muestra obtenida de las calicatas



FOTO 07: Secando al aire la muestra obtenida de las calicatas y tamizando



FOTO 08: Realizando el análisis granulométrico



FOTO 09: Tamizando el material por la Nro. 40 para realizar el ensayo de los límites de Atterberg



FOTO 10: Realizando el límite líquido



FOTO 11: Muestras obtenidas del límite líquido



FOTO 12: Realizando el límite Plástico



FOTO 13: Muestras obtenidas del límite plástico



FOTO 14: Mezclando la muestra con un porcentaje de agua
para el proctor modificado



FOTO 15: realizando el proctor modificado



FOTO 16: mezclando suelo con cal para el proctor modificado



FOTO 17: mezclando suelo con cal y agua para el proctor modificado



FOTO 18: obteniendo la muestra del proctor modificado



FOTO 19: muestra del proctor modificado



FOTO 20: obteniendo la muestra del molde del proctor modificado



FOTO 21: colocando las muestras en el horno para obtener su peso seco



FOTO 22: mezclando la muestra de suelo con cal para el ensayo de CBR



FOTO 23: realizando el ensayo de CBR junto a mi asesor



FOTO 24: realizando el ensayo de CBR junto a mi asesor



FOTO 25: colocando la capa final en el molde para ser compactado



FOTO 26: lectura de peso del molde más muestra en el ensayo de CBR



FOTO 27: Muestras de CBR sumergidas en el agua por 96 horas



FOTO 28: lectura de la deformación de la muestra en el ensayo de CBR de hinchamiento



FOTO 29: lectura de la deformación de la muestra en el ensayo de CBR de hinchamiento



FOTO 30: muestras colocadas en forma horizontal por 15 min para luego realizar el ensayo de penetración



FOTO 31: Ensayo de penetración



FOTO 32: colocando las muestras en el horno para obtener su peso seco

ANEXO N.º 4. FICHA TÉCNICA DE LA CAL

<u>CAL HIDRATADA</u>	
<u>DESCRIPCIÓN</u>	Cal Hidratada o Hidróxido de Calcio, que se obtiene como resultado del proceso de hidratación de la Cal Viva. Es un polvo de color blanco que puede tener una ligera tonalidad crema, de alta finura y muy liviana.
<u>FÓRMULA QUÍMICA</u>	Ca (OH) ₂
<u>USO</u>	Estabilizante de suelos limo arcillosos en porcentajes 2%, 4%, 6% y 8% del peso del material.
<u>PRECAUCIONES PERSONALES</u>	Evitar el contacto con la piel y los ojos. Llevar equipo de protección adecuado.
<u>MEDIDAS DE PROTECCIÓN</u>	Ojos: Usar gafas de protección total aprobadas por ANSI; no se recomienda usar lentes de contacto en condiciones polvorientas. Piel: Utilizar guantes impermeables de caucho o nitrilo para evitar el contacto con la piel. Quitarse la ropa y los EPP corporales que se saturan de cal hidratada.
<u>MEDIDAS CORRECTIVAS</u>	En caso de contacto prolongado con la piel se debe lavar con agua y jabón y luego aplicar crema, para evitar su resecamiento. En caso de contacto con los ojos, lavar inmediatamente con abundante agua y concurrir al médico. En caso de ingestión, acudir inmediatamente al médico
<u>PRECAUCIONES AMBIENTALES</u>	Evitar la contaminación de desagües, aguas superficiales y subterráneas