

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**EFFECTO DE LA CAL COMO ESTABILIZANTE DE UNA  
SUBRASANTE DE SUELO ARCILLOSO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:  
ROBINSON JARA ANYAYPOMA**

**ASESOR**

**Dra. Ing. ROSA LLIQUE MONDRAGON**

**CAJAMARCA - PERÚ**

**2014**

**COPYRIGHT © 2014 by**  
**ROBINSON JARA ANYAYPOMA**  
**Todos los derechos reservados**

## **DEDICATORIA**

Dedico principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi padre y madre, por el apoyo incondicional que me han brindado, A mis hermanas, por estar siempre conmigo. A mis compañeros, porque sin el equipo que formamos, no hubiéramos logrado esta meta.

## ÍNDICE

Contenido	Pág.
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.4 ALCANCES O DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.5 LIMITACIONES.....	2
1.6 OBJETIVOS.....	2
1.6.7 Objetivo general.....	2
1.6.8 Objetivos específicos.....	2
1.7 HIPÓTESIS.....	2
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.2 BASES TEÓRICAS.....	5
2.2.1 Suelos.....	5
2.2.2 Origen de los suelos.....	5
2.2.3 Suelos residuales.....	7
2.2.4 Suelos sedimentarios.....	7
2.2.5 Propiedades físicas y clasificación de los suelos.....	9
2.2.6 Físico-Química de las arcillas.....	22
2.2.7 Cal.....	25
2.2.7.1 Funciones de la cal.....	26
2.2.7.2 Tipos de cal.....	26
2.2.8 Estabilización de suelos.....	28
2.2.9 Tipos de estabilización.....	29
2.2.9.1 Estabilización física.....	29
2.2.9.2 Estabilización química.....	30

2.2.9.3	Estabilización mecánica.....	30
2.2.10	Estabilización con cal.....	31
2.2.10.1	Modificación con cal y secado de suelos.....	32
2.2.11	Estabilización de subrasante (o subbase) con cal.....	33
2.2.11.1	Escarificación y pulverización inicial.....	33
2.2.11.2	Aplicación de la cal viva.....	33
2.2.11.3	Aplicación de la cal hidratada seca.....	34
2.2.11.5	Mezcla preliminar y aplicación de agua.....	36
2.2.11.6	Período de fraguado.....	36
2.2.11.7	Mezcla final y pulverización.....	36
2.3	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	36
<b>CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>		<b>39</b>
3.1	TIPO, NIVELES, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	39
3.1.1	Población de estudio.....	40
3.1.2	Muestra.....	40
3.1.3	Unidad de análisis.....	40
3.1.4	Técnicas e instrumentos de recolección.....	41
3.1.5	Ubicación geográfica donde se realiza la investigación.....	41
3.2	PROCEDIMIENTO.....	42
3.2.1	Materiales a utilizar.....	42
3.2.2	Equipos a utilizar.....	43
3.2.3	Ensayos para el suelo arcilloso con adición de cal al 0%.....	43
3.2.3.1	Determinación contenido de humedad (W%).....	43
3.2.3.2	Análisis granulométrico mediante tamizado por lavado.....	44
3.2.3.3	Límite líquido 0% de cal.....	45
3.2.3.4	Límite plástico 0% de cal.....	46
3.2.3.5	Compactación Proctor modificado 0% de cal.....	47
3.2.3.5	Ensayo CBR en laboratorio 0% de cal.....	49
3.2.4	Ensayos para el suelo arcilloso con adición de 2%, 4% y 6% de cal.....	52
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>		<b>53</b>
4.1	RESULTADOS.....	53
4.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55

4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	59
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	60
5.1 CONCLUSIONES .....	60
5.2 RECOMENDACIONES .....	61
ANEXOS .....	64
1. TABLAS DE CÁLCULO DE RESULTADOS .....	65
2. GALERÍA DE FIGURAS.....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Pág.
Tabla 1 Adición de cal.....	4
Tabla 2 Denominaciones de la compacidad (Das, 2001).....	12
Tabla 3 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos tipo grava. (Das, 2001).....	19
Tabla 4 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos arenosos. (Das, 2001).....	19
Tabla 5 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos. (Das, 2001).....	20
Tabla 6 Clasificación AASHTO ASTM D 3282-94 .....	21
Tabla 7 Diseño y método de investigación .....	39
Tabla 8 Cantidad de muestra a ensayar .....	40
Tabla 9 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	41
Tabla 10 Coordenadas Cajamarca .....	41
Tabla 11 Ubicación del suelo arcilloso.....	42
Tabla 12 Resultados de ensayos del suelo con cal al 0% .....	53
Tabla 13 Resultados de ensayos del suelo con cal al 2% .....	53
Tabla 14 Resultados de ensayos del suelo con cal al 4% .....	54
Tabla 15 Resultados de ensayos del suelo con Cal al 6%.....	54
Tabla 16 Resumen Límite líquido, plástico e índice de plasticidad .....	55
Tabla 17 Compactación Proctor y CBR .....	57
Tabla 18 Contenido de humedad cal al 0%.....	65
Tabla 19 Análisis granulométrico por lavado .....	66
Tabla 20 Límite líquido para suelo con 0% de Cal .....	67
Tabla 21 Límite plástico ASTM D 4318 0% de cal .....	68
Tabla 22 Parámetros del suelo cal al 0% .....	68
Tabla 23 Proctor modificado 0% de cal.....	69
Tabla 24 Compactación CBR 0% de cal fase A.....	70
Tabla 25 CBR carga-penetración 0% de cal fase B.....	71
Tabla 26 CBR esfuerzos 0% de cal fase C.....	72

Tabla 27 Límite líquido para suelo con 2% de cal .....	73
Tabla 28 Límite plástico ASTM D 4318 2% Cal.....	74
Tabla 29 Parámetros del Suelo Cal al 2%.....	74
Tabla 30 Proctor Modificado Cal al 2% .....	75
Tabla 31 Compactación CBR fase A cal al 2%.....	76
Tabla 32 CBR carga-penetración fase B cal al 2% .....	77
Tabla 33 CBR esfuerzos fase C cal al 2% .....	78
Tabla 34 Límite líquido para suelo cal al 4% .....	79
Tabla 35 Límite plástico ASTM D 4318 cal al 4%.....	80
Tabla 36 Parametros del Suelo Cal al 4%.....	80
Tabla 37 Proctor Modificado Cal al 4% .....	81
Tabla 38 Compactación CBR Fase A Cal al 4%.....	82
Tabla 39 CBR carga-penetración fase B cal al 4% .....	83
Tabla 40 CBR esfuerzos fase C cal al 4% .....	84
Tabla 41 Límite líquido para Suelo con 6% Cal .....	85
Tabla 42 Límite plástico ASTM D 4318 6% cal.....	86
Tabla 43 Parámetros del Suelo cal al 6%.....	86
Tabla 44 Proctor modificado cal al 6% .....	87
Tabla 45 Compactación CBR Fase A cal al 6%.....	88
Tabla 46 CBR carga-penetración fase B cal al 6% .....	89
Tabla 47 CBR esfuerzos fase C cal al 6% .....	90



## ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Fig. 1 Perfil de Meteorización, Según diversas fuentes (Muelas s.f.) .....	6
Fig. 2 Esquema del proceso de formación de los suelos (Muelas s.f.).....	8
Fig. 3 Relación entre las fases de un suelo. ....	9
Fig. 4 Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951).....	13
Fig. 5 Curvas granulométricas (Muelas s.f.).....	15
Fig. 6 Comportamiento del suelo al de un líquido (Muelas s.f.).....	16
Fig. 7 Carta de plasticidad de Casagrande (Das, 2001).....	17
Fig. 8 Esquema de la estructura de la lámina silícica .....	23
Fig. 9 Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica .....	23
Fig. 10 Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica .....	25
Fig. 11 Comportamiento del límite líquido sobre los porcentajes de cal.....	55
Fig. 12 Comportamiento del límite plástico sobre los porcentajes de cal. ....	55
Fig. 13 Comportamiento del índice de plasticidad sobre los porcentajes de cal.....	56
Fig. 14 Comportamiento de la D <sub>smax</sub> sobre los porcentajes de cal.....	57
Fig. 15 Comportamiento del contenido de humedad (W%) sobre los porcentajes de cal. .....	57
Fig. 16 Comportamiento del CBR sobre los porcentajes de cal.....	58
Fig. 17 La capa estabilizada con cal soporta la erosión, ilustrando la resistencia. (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004) .....	91
Fig. 18 Escarificación antes de la aplicación de la cal. ....	91
Fig. 19 Camellón utilizado para contener la cal antes de la mezcla.....	91
Fig. 20 Ejemplo de aplicación de lechada (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004).....	92
Fig. 21 Secado del material arcilloso.....	92
Fig. 22 Preparando material para el ensayo proctor modificado cal al 0%. ....	92
Fig. 23 Ensayo proctor modificado cal al 0%. ....	93
Fig. 24 Peso de molde proctor más muestra compactada cal al 0%.....	93
Fig. 25 Muestra con adición de cal al 2%.....	93

Fig. 26 Muestras para ensayo proctor modificado cal al 2% con diferentes contenidos de humedad. ....	94
Fig. 27 Muestra con adición de cal al 4%. ....	94
Fig. 28 Pesado de cal al 6% para un peso de suelo de 15 Kg. ....	94
Fig. 29 Muestra con adición de cal al 6%. ....	95
Fig. 30 Muestras preparadas con cal al 6% y con diferentes humedades para ensayo de proctor modificada. ....	95
Fig. 31 Forma de medición del agua para los ensayos proctor modificado. ....	95
Fig. 32 Muestras para ensayo de C.B.R. con cal al 0% y 2%. ....	96
Fig. 33 Peso de molde más muestra compactada y cal al 0%. ....	96
Fig. 34 Muestras cal al 0% y 2% listas para ensayo de hinchamiento. ....	96
Fig. 35 Muestras para ensayo de limites líquido y plástico con porcentajes de cal al 2%, 4% 6%. ....	97
Fig. 36 Ensayo CBR para lecturas de expansión. ....	97
Fig. 37 Control de expansión. ....	97
Fig. 38 Ensayo de penetración ....	98
Fig. 39 Muestras ensayadas CBR. ....	98
Fig. 40 Cal que se utilizó en el proyecto. ....	98

## RESUMEN

Los suelos arcillosos presentes en una subrasante crean problemas debido a su elevada plasticidad, reducida capacidad de soporte e inestabilidad de volumen en función de la humedad, por ello centramos nuestro objetivo en evaluar el efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso para el mejoramiento de sus propiedades físicas y mecánicas mediante procedimientos normados. Para la evaluación se trabajó con diferentes porcentajes de cal, 0%, 2%, 4% y 6%, en peso de la muestra de suelo arcilloso a evaluar, tomando estos porcentajes de cal según norma ASTM 6276 y ejecutando los ensayos de acuerdo a procedimientos normados. Los resultados obtenidos de ésta evaluación de estabilización son variaciones muy grandes, en el índice de plasticidad bajo a un valor de 9.23 con la adición de cal al 6% siendo el Índice de plasticidad inicial de 36.87 con la adición de cal al 0%, y una variación considerable en el CBR (capacidad de soporte), logrando alcanzar un valor de 11.48% al adicionarle cal al 4% siendo el CBR con cal al 0% de 2.55. Evaluando los resultados obtenidos, con los diferentes porcentajes de cal, para el tipo de suelo A-7-5(29), se tiene mejores resultados con la adición de 4% de cal con la cual se obtiene el máximo CBR al 95% que es de 11.48%.

**Palabras claves:** Estabilizante, cal, suelo arcilloso, subrasante, plasticidad, capacidad de soporte, Índice de plasticidad.

## ABSTRACT

Clay soils present on a subgrade create problems due to their high plasticity, reduced capacity to support volume and instability in function of humidity, therefore we focus our objective to evaluate the effect of lime as a stabilizer in a clay soil subgrade to improve their physical and mechanical properties through regulated procedures. For evaluation we worked with different percentages of lime, 0%, 2%, 4% and 6% by weight of clay soil sample to evaluate, taking these percentages of lime per ASTM 6276 and running tests according to regulated procedures. The results of this evaluation are very large variations stabilization, in low plasticity index to a value of 9.23 with the addition of lime to 6% being the initial plasticity index 36.87 with the addition of lime to 0%, and considerable variation in the CBR (carrying capacity), managing to reach a value of 11.48% when added lime to 4% and the CBR with lime to 0% 2.55. Evaluating the obtained results with different percentages of lime to the soil type A-7-5 (29), have better results with the addition of 4% lime with which the maximum CBR is obtained by 95% to is 11.48%.

**Keywords:** Stabilizer, lime, clay soil subgrade, plasticity, bearing capacity, plasticity index.

# **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Planteamiento del problema.**

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes. Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras y pavimentos, por tal motivo desde hace algunas décadas se ha tratado de realizar el mejoramiento de estos suelos empleando diversas técnicas de estabilización, utilizando diversos materiales, como cales, cementos, aditivos, emulsiones, enzimas. A pesar de que ya se han realizado investigaciones, se ha observado que cada caso presenta resultados particulares inherentes al tipo de suelo de la región en estudio.

El comportamiento de los suelos influye en el comportamiento de la estructura, entonces, resulta importante conocer si las propiedades y características de éste son apropiadas, de no ser así se recurren a métodos de mejoramientos denominados estabilización de suelos como por ejemplo la adición de materiales cementantes.

La ciudad de Cajamarca presenta suelos arcillosos de alta y baja plasticidad las cuales no cumplen con las exigencias de las normas técnicas para fundar estructuras. Es por esta razón el presente trabajo se enfoca a evaluar los efectos de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso del acceso al centro comercial open plaza.

## **1.2 Formulación del problema.**

El problema que enfocaremos es ¿Cuál es el efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso?

## **1.3 Justificación de la investigación.**

La aplicación de la cal como material estabilizante de suelos de fundación es utilizado por ejemplo en las capas subrasantes, aunque existen muchos estudios sobre este tema en la presente investigación se va a estudiar el efecto de dicho material estabilizante agregado en ciertas proporciones específicamente en un suelo arcilloso correspondiente del acceso al centro comercial open plaza

## **1.4 Alcances o delimitaciones de la investigación.**

Las propiedades que se evaluaron son: límite líquido, límite plástico, densidad seca máxima y el valor relativo de soporte (CBR). Utilizando cal en proporciones de 2%, 4% y 6%. Norma ASTM D 6276.

## **1.5 Limitaciones.**

La investigación está limitada a suelos arcillosos.

## **1.6 Objetivos.**

### **1.6.7 Objetivo general.**

Evaluar el efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso.

### **1.6.8 Objetivos específicos.**

- Evaluar el efecto de la cal en el límite líquido y límite plástico, del suelo arcilloso.
- Evaluar el efecto de la cal en la densidad seca máxima del suelo arcilloso.
- Evaluar el efecto de la cal en el valor relativo de soporte (CBR) del suelo arcilloso.

## **1.7 Hipótesis.**

Con la adición de cal (2%, 4% y 6%), en el suelo arcilloso de la subrasante del acceso al centro comercial open plaza se mejorará sus propiedades físicas y mecánicas (límites de Atterberg, la densidad seca máxima y el valor relativo de soporte) entre un 25% a 50%.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

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

La cal es uno de los conglomerantes hidráulicos con mayor historia en el mundo de la construcción. Durante siglos se ha empleado con profusión como tal en morteros de albañilería, así como para enfoscados y revocos. En los últimos decenios su uso se ha extendido a la mejora de suelos para su estabilización en vías y explanaciones.

La justificación de estas referencias tan ancestrales está probablemente en que su producción se basa en procesos naturales aplicados sobre materiales naturales presentes en el medio de manera frecuente. (Bauzá 2005)

Desde siempre se ha usado la cal como aglomerante en la construcción. La obra más antigua que se conoce tiene aún un espesor de 25 cm y data de nada menos que 5.600 años A.C. fue descubierta durante excavaciones en las riberas del río Danubio en Lapenski Vir (Yugoslavia). Fue empleada para hacer pisos de chozas en un pueblo de la edad de piedra. (Calcinor 2010)

También se usó la cal como elemento de unión y sellante de bloques en la pirámide de Kheops. Cada bloque pesa más de 3 toneladas y son unidos por juntas de espesor inferior a medio milímetro. Juntos todos los bloques forman una pirámide de 2.600.0000 m<sup>3</sup> y 146 metros de altura, no superada esta, durante los siguientes 400 años hasta la construcción de algunas catedrales. (Calcinor 2010)

Centrándonos en el tratamiento de suelos, recordemos la famosa Vía Apia de la época de la civilización romana y que aún está en “servicio” y que se construyó mezclando el suelo existente con cal. (Calcinor 2010)

#### **Antecedentes Internacionales**

En Costa Rica Arrieta *et al* 2010 estabilizando suelos con cal con porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% logran una conclusión de comparar los resultados que los cuatro porcentajes utilizados se encuentran por encima de la resistencia a la compresión mínima (1725 kPa) solicitada para utilizar el material como sub base o material selecto en pavimentos flexibles, inclusive los resultados están muy por encima de este valor, con resistencias que van desde los 3103 kPa hasta los 3790 kPa aproximadamente;

entonces las dosificaciones pueden ser reducidas y aun así cumplirán con los requisitos de resistencia, sin embargo no llegan a ser suficiente para ser utilizada como una base.

### Antecedentes Nacionales

En el Perú la estabilización de suelos arcillosos con cal esta fundamentalmente centrado en la selva amazónica por contar con una gran variedad de suelos arcillosos y con alto contenido de humedad. En el tercer congreso internacional realizado en Sao Pablo, Brasil, de infraestructura de transportes (CONINFRA 2009) presentaron una estabilización de una subrasante de suelo arcilloso con cal llegando a obtener los siguientes resultados como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 1 Adición de cal

% CAL	PASA N° 200	L.L.	IP	CLASIFICACIÓN		MAX. DENS.	HUM. OPT.	CBR AL 95% MDS0.1"	COMPRESION NO CONFINADA (28d) (Mpa)
				AASHTO	SUCS				
0.0	36.7	29.4	10.2	A-4 (0)	SC	1.945	13.3	23.0%	-
2.0	38.6	30.6	7.4	A-4 (1)	SM	1.920	13.7	54.0%	1.55
3.0	39.2	31.2	5.0	A-4 (1)	SM	1.902	14.2	75.0%	1.97
4.0	39.2	31.2	5.0	A-4 (1)	SM	1.902	14.2	82.5%	2.22
5.0	40.4	32.2	2.0	A-4 (1)	SM	1.890	14.5	90.0%	2.24
6.0	41.0	30.1	3.9	A-4 (1)	SM	1.870	14.7	69.0%	2.1

Fuente: CONINFRA 2009

### Antecedentes Locales

A la fecha no tenemos información que se haya realizado algún estudio o practicado estabilizaciones de subrasantes de suelos arcillosos.



## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Suelos.**

Es común creencia que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización. Pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”. En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y éste es un hecho del que se hace abundante aplicación. (Juárez y Rico 2005)

### **2.2.2 Origen de los suelos.**

La mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por la meteorización de las rocas. Los geólogos emplean el término meteorización de las rocas para describir todos los procesos externos, por medio de los cuales la roca experimenta descomposición química y desintegración física, proceso mediante el cual masas de roca se rompen en fragmentos pequeños. Esta fragmentación continua es un mero cambio físico y por eso se llama también meteorización mecánica. Por otra parte, la meteorización química de una roca es un proceso de descomposición, mediante el cual los minerales constitutivos de rocas allí presentes cambian de composición química. En la descomposición, los minerales persistentes se transforman en minerales de composición y propiedades físicas diferentes. Es preciso indicar que la desintegración física completa la descomposición, ya que los minerales y partículas rocosas de menor tamaño producidos por meteorización mecánica son mucho más susceptibles al cambio químico que los granos minerales firmemente soldados en grandes masas de roca compacta (Muelas s.f.).

La meteorización mecánica es el proceso por el cual las rocas se fracturan en piezas de menor tamaño bajo la acción de las fuerzas físicas, como la corriente de agua de los ríos, viento, olas oceánicas, hielo glacial, acción de congelación, además de expansiones y contracciones causadas por ganancia y pérdida de calor (Muelas s.f.).

La meteorización química es el proceso de descomposición química de la roca original. Entre los distintos procesos de alteración química pueden citarse: la hidratación (paso de anhidrita a yeso), disolución (de los sulfatos en el agua), oxidación (de minerales de hierro expuestos a la intemperie), cementación (por agua conteniendo carbonatos), etc.

Por ejemplo, la meteorización química de los feldspatos puede producir minerales arcillosos (Muelas s.f.).

Muy relacionada con la meteorización química se encuentra la meteorización biológica, producida fundamentalmente por la actividad bacteriana, originando putrefacciones en materiales orgánicos.

La acción conjunta o individual de estos procesos de meteorización da lugar a un perfil de meteorización de la roca en función de la profundidad (ver figura 1). En este perfil la roca sana ocupa la zona más profunda, transformándose gradualmente a suelo hacia la parte más superficial.

PERFIL ESQUEMÁTICO	LOVE (1951) LITTLE (1961)	VARGAS (1951)	SOWERS (1954, 1963)	CHANDLER (1969)	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (197?)	
	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS, BASÁLTICAS Y ARENISCAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	
	VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	IV COMPLETAMENTE ALTERADA	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA	
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	IV a	V COMPLETAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IB	
	IV ALTAMENTE ALTERADA	CAPAS DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA	PARCIALMENTE ALTERADA	III	IV ALTAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IC (SAPROLITO)
	III MODERADAMENTE ALTERADA				II	III MODERADAMENTE ALTERADA	IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
	II ALGO ALTERADA				I	II DEBILMENTE ALTERADA	IB PARCIALMENTE METEORIZADA
	I ROCA SANA	ROCA SANA	ROCA INALTERADA	ROCA INALTERADA	I a ROCA SANA	ROCA SANA	ROCA SANA

Fig. 1 Perfil de Meteorización, Según diversas fuentes (Muelas s.f.).

Así, por ejemplo, la observación de una trinchera recién abierta (una excavación para una carretera, una pared de cantera, etc.), a menudo revelará una sucesión de capas de diferentes materiales térreos. En la base del afloramiento puede haber roca compacta, denominada roca firme; se encuentra todavía en su lugar de origen y está relativamente poco modificada. La roca firme suele presentar innumerables grietas, denominadas juntas o diaclasas, que son consecuencia de esfuerzos principalmente asociados a una historia anterior de procesos tectónicos. Allí donde existen familias de juntas que se cruzan, la roca firme se desintegra fácilmente en bloques.

Por encima de la roca firme puede haber una capa de materia mineral blanda, denominada regolita. (El prefijo rego viene de la palabra griega que significa “manto”.) La regolita puede formarse in situ por descomposición y desintegración de la roca firme inmediatamente subyacente; este tipo se denomina regolita residual o suelo residual. Si esta capa de partículas minerales relativamente sueltas o blandas, dispuestas sobre la roca firme, es transportada por agentes tales como corrientes de agua, hielo, viento, olas..., recibe el nombre de regolita transportada o suelo sedimentario (Muelas s.f.).

### **2.2.3 Suelos residuales**

Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de las rocas no son transportados como sedimentos, sino que se acumulan in situ. Si la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de descomposición, se produce una acumulación de suelo residual. Entre los factores que influyen sobre la velocidad de alteración en la naturaleza de los productos de meteorización están el clima (temperatura y lluvia), el tiempo, la naturaleza de la roca original, la vegetación, el drenaje y la actividad bacteriana. Los suelos residuales suelen ser más abundantes en zonas húmedas, templadas, favorables al ataque químico de las rocas y con suficiente vegetación para evitar que los productos de meteorización sean fácilmente arrastrados.

### **2.2.4 Suelos sedimentarios**

La formación de los suelos sedimentarios puede explicarse más adecuadamente considerando la formación, el transporte y el depósito de los sedimentos.

El modo principal de la formación de sedimentos lo constituye la meteorización física y química de las rocas en la superficie terrestre. En general, las partículas de limo, arena y grava se forman por la meteorización física de las rocas, mientras que las partículas arcillosas proceden de la alteración química de las mismas.

Los sedimentos pueden ser transportados por cualquiera de los cinco agentes siguientes: agua, aire, hielo, gravedad y organismos vivos. El transporte afecta a los sedimentos de dos formas principales:

- a) modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución;
- b) produce una clasificación o graduación de las partículas.

Después de que las partículas se han formado y han sido transportadas se depositan para formar un suelo sedimentario. Las tres causas principales de este depósito en el agua son la reducción de la velocidad, la disminución de la solubilidad y el aumento de electrolitos. Cuando una corriente de agua desemboca en un lago, océano, etc., pierde la mayor parte de su velocidad. Disminuye así la fuerza de la corriente y se produce una sedimentación. Cualquier cambio en la temperatura del agua o en su naturaleza química puede provocar una reducción en la solubilidad de la corriente, produciéndose la precipitación de algunos de los elementos disueltos (Muelas s.f.).

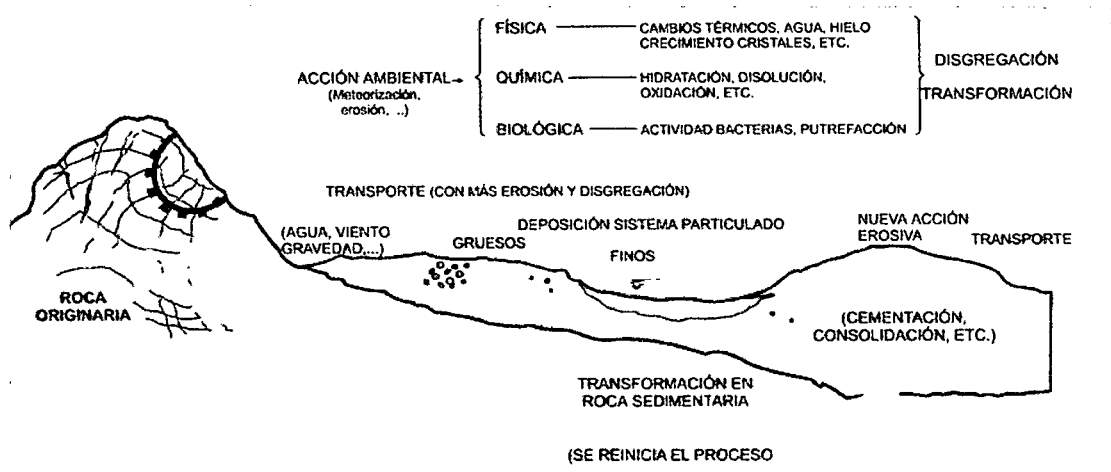


Fig. 2 Esquema del proceso de formación de los suelos (Muelas s.f.).

Por tanto, el suelo es el resultado del proceso de meteorización de las rocas, con o sin transporte de los productos de alteración. Los suelos se caracterizan fundamentalmente por los siguientes aspectos:

- Los suelos están formados por partículas pequeñas (desde micras a algunos centímetros) e individualizadas que pueden considerarse indeformables.
- Entre estas partículas quedan huecos con un volumen total del orden de magnitud del volumen ocupado por ellas (desde la mitad a varias veces superior).
- Un suelo es un sistema multifase (sólida, líquida y gaseosa).
- Los huecos pueden estar llenos de agua (suelos saturados), o con aire y agua (suelos semisaturados), lo que condiciona la respuesta de conjunto del material.

En condiciones normales de presión y temperatura, el agua se considera incomprensible.

## 2.2.5 Propiedades físicas y clasificación de los suelos

### a) Relaciones peso-volumen

Como se mencionó en el apartado anterior, el suelo constituye un sistema de varias fases. La figura siguiente muestra un elemento típico de suelo que contiene 3 fases diferenciadas: sólida (partículas minerales), líquida (agua generalmente) y gaseosa (aire o gas). La parte de la izquierda representa las tres fases como podrían presentarse en un elemento de suelo natural. En la parte de la derecha se han separado las tres fases con el fin de facilitar la deducción de las relaciones entre ellas. (Das, 2001)

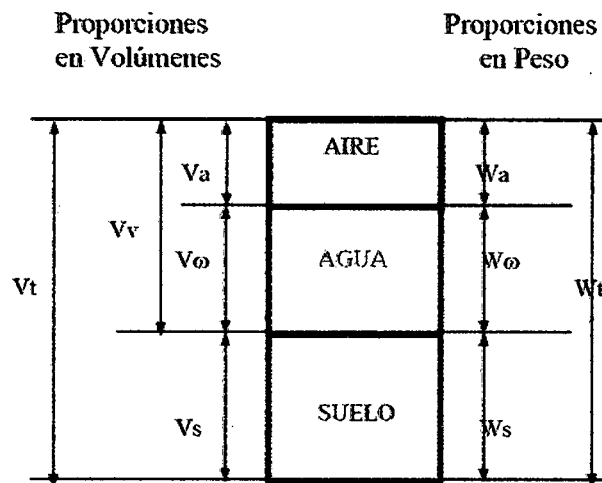


Fig. 3 Relación entre las fases de un suelo.

Los términos que aparecen en la figura anterior representan los siguientes conceptos:

$V_t$ : Volumen total del elemento de suelo

$V_s$ : Volumen ocupado por las partículas de suelo

$V_w$ : Volumen ocupado por la fase líquida (agua)

$V_g$ : Volumen ocupado por la fase gaseosa (aire)

$V_v$ : Volumen ocupado por los huecos (fase líquida + fase gaseosa)

Wt: Peso total del elemento de suelo

Ws: Peso de las partículas de suelo

Ww: Peso de la fase líquida (agua)

Wa: Peso de la fase gaseosa (aire)  $\approx 0$

Las expresiones que relacionan las distintas fases son las siguientes:

#### Relaciones en volumen

$$\text{Índice de huecos o poros: } e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

$$\text{Porosidad: } n = \frac{V_v}{V_t} \quad (2)$$

$$\text{Grado de saturación: } S = \frac{V_w}{V_s} \quad (3)$$

Las relaciones entre el índice de huecos y la porosidad son las siguientes:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_t - V_s} = \frac{n}{1-n} \quad (4)$$

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{e}{1+e} \quad (5)$$

#### Relaciones en peso

$$\text{Humedad: } w = \frac{W_w}{W_s} \quad (6)$$

$$\text{Peso específico de las partículas sólidas: } \gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (7)$$

Peso específico del agua: 
$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad (8)$$

Peso específico seco: 
$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} = \frac{W_s}{V_s + V_v} = \frac{\gamma_s}{1+e} \quad (9)$$

Peso específico aparente: 
$$\gamma_{ap} = \frac{W_t}{V_t} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{\gamma_s + w\gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma_s + w\gamma_s W_s}{1+e} = \frac{1+w}{1+e} \gamma_s = \gamma_d (1+w) \quad (10)$$

Peso específico saturado ( $V_v = V_w = e$ ) 
$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} \quad (11)$$

### b) Densidad o compacidad relativa

Una magnitud muy empleada para caracterizar la compacidad de un suelo granular es la densidad relativa, definida como:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 = \frac{\gamma_{d,max}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d,min}}{\gamma_{d,max} - \gamma_{d,min}} \times 100 \quad (12)$$

Siendo:

$e_{max}$ : Índice de huecos del suelo en el estado más suelto

$e_{min}$ : Índice de huecos del suelo en el estado más denso

$e$ : Índice de huecos in situ

$\gamma_d$ : Peso específico seco in situ

$\gamma_{d,max}$ : Peso específico seco en el estado más denso ( $e_{min}$ )

$\gamma_{d,min}$ : Peso específico seco en el estado más suelto ( $e_{max}$ )

En la tabla siguiente se indican las denominaciones de la compacidad de los suelos granulares a partir de su densidad relativa:

Tabla 2 Denominaciones de la compacidad (Das, 2001)

Densidad Relativa (%)	Denominación
0 - 15	Muy suelto
15 - 35	Suelto
35 - 65	Medio
65 - 85	Denso
85 - 100	Muy denso

### c) Granulometría

En cualquier masa de suelo, los tamaños de las partículas varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, es decir, la distribución, en porcentaje, de los distintos tamaños dentro del suelo.

La distribución granulométrica de partículas de tamaño superior a 0,08 mm. Se determina generalmente mediante un análisis granulométrico por tamizado. Para partículas de tamaño inferior al mencionado (0,08 mm.) se emplea la granulometría por sedimentación.

El análisis granulométrico por tamizado se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de tamices (cuyo tamaño de malla suele ir disminuyendo en progresión geométrica de razón 2), agitando el conjunto. La cantidad de suelo retenido en cada tamiz se pesa y se determina el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz.

El porcentaje de material que pasa por cada tamiz, determinado de la forma anterior, se representa en un gráfico semilogarítmico. El diámetro de la partícula se representa en una escala logarítmica (abscisas), y el porcentaje de material que pasa se representa en escala aritmética (ordenadas). En la figura siguiente se muestra un ejemplo de esta curva.



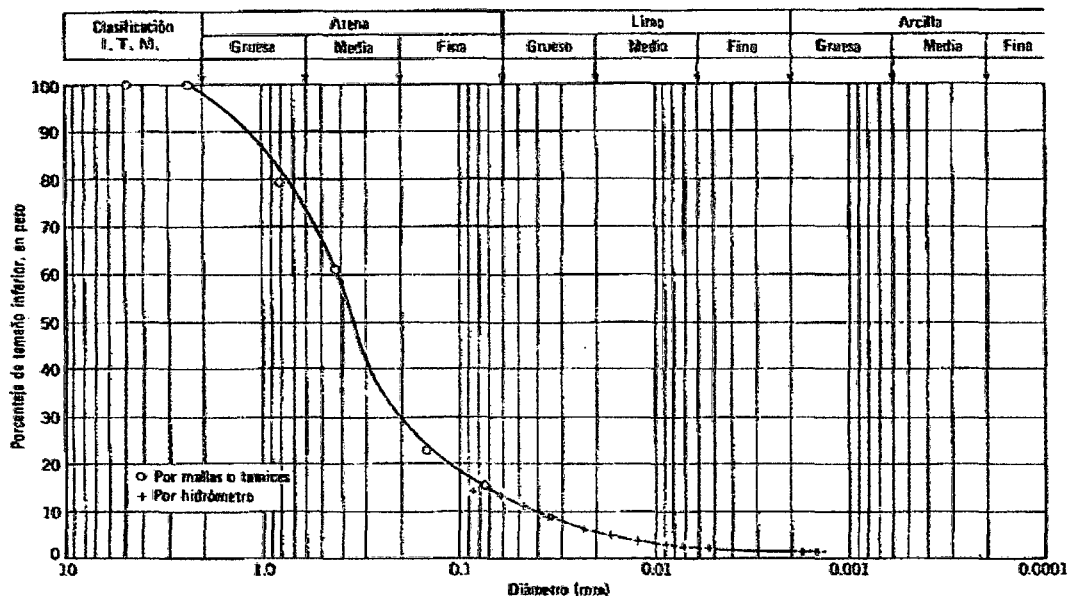


Fig. 4 Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951)

Una vez determinada dicha curva granulométrica, existen dos coeficientes que se utilizan para una mejor descripción de la granulometría de un suelo. Estos coeficientes son:

Coefficiente de uniformidad: 
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{15}} \quad (13)$$

Coefficiente de curvatura: 
$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}} \quad (14)$$

El coeficiente de uniformidad representa la relación entre el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 60% de material y el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 10%. Si  $C_u$  es menor que 5, el suelo tiene una granulometría uniforme. Si  $5 < C_u < 20$ , el suelo es poco uniforme; y si  $C_u > 20$ , se considera bien graduado. Cuanto más uniforme es el suelo, más uniforme es el tamaño de sus huecos y más difícil es su compactación, al no existir una cierta variación de tamaños que rellenen adecuadamente los huecos.

El coeficiente de curvatura, también llamado de graduación, ha de adoptar valores entre 1 y 3 para considerar al suelo bien graduado. Se determina dividiendo el cuadrado del diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 30% del material,

entre el producto de los diámetros correspondientes a los tamices por los que pasa un 60% y un 10% del material.

El análisis granulométrico por sedimentación (partículas de tamaño inferior a 0,08 mm.) se lleva a cabo con el hidrómetro, y se basa en el principio de la sedimentación de las partículas de suelo en agua. Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que está aún en suspensión en cualquier tiempo dado,  $t$ . Así, con lecturas tomadas en tiempos diferentes en el hidrómetro, el porcentaje de suelo más fino que un diámetro dado puede calcularse y prepararse una gráfica de la distribución granulométrica.

Con los dos métodos de análisis granulométrico expuestos puede determinarse la curva granulométrica completa de una muestra de suelo (ver curvas granulométricas adjuntas). En función de la granulometría se clasifican los suelos en cuatro grandes grupos:

- **Gravas**, con tamaño de grano entre unos 80 mm. y 4,75 mm. Los granos son observables directamente, existen grandes huecos entre las partículas y no retienen el agua.
- **Arenas**, con partículas de tamaño entre 4,75 mm. y 0,075 mm. Estas son observables a simple vista y se mantienen inalterables en presencia de agua.
- **Limos**, con partículas comprendidas entre 0,075 mm. y 0,002 mm. Retienen el agua y si se forma una pasta limo-agua y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se aprecia cómo el agua se exhuda con facilidad.
- **Arcillas**, cuyas partículas tienen tamaños inferiores a 0,002 mm. Son partículas de tamaño gel y están formadas por minerales silicatados, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, unidas por enlaces covalentes débiles y pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas, produciendo aumentos de volumen, a veces muy importantes. Por tanto, presentan una gran capacidad de retención de agua, con un porcentaje de huecos muy elevado (huecos pequeños pero

con una gran superficie de absorción en las partículas). Debido a que el tamaño de los huecos es muy pequeño (aunque el índice de huecos es levado), exhiben unos tiempos de expulsión de agua muy elevados y una permeabilidad muy baja.

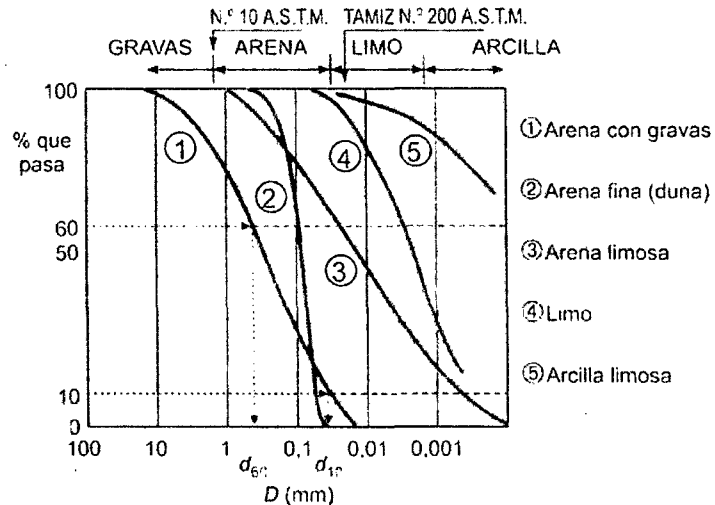


Fig. 5 Curvas granulométricas (Muelas s.f.).

#### d) Plasticidad

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua.

Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan Límites de Atterberg. El concepto de que un suelo puede presentarse en varios estados, en función del contenido de humedad, se basa en que cuanto mayor sea la cantidad de agua que contiene un suelo, menor será la interacción entre partículas adyacentes y más se aproximará el comportamiento del suelo al de un líquido (ver esquema adjunto).

Esta variación de la consistencia en función de la humedad (plasticidad) es propia de suelos finos (arcillas y limos), ya que los suelos gruesos (arenas y gravas) no retienen agua y se mantienen inalterables en presencia de ésta.

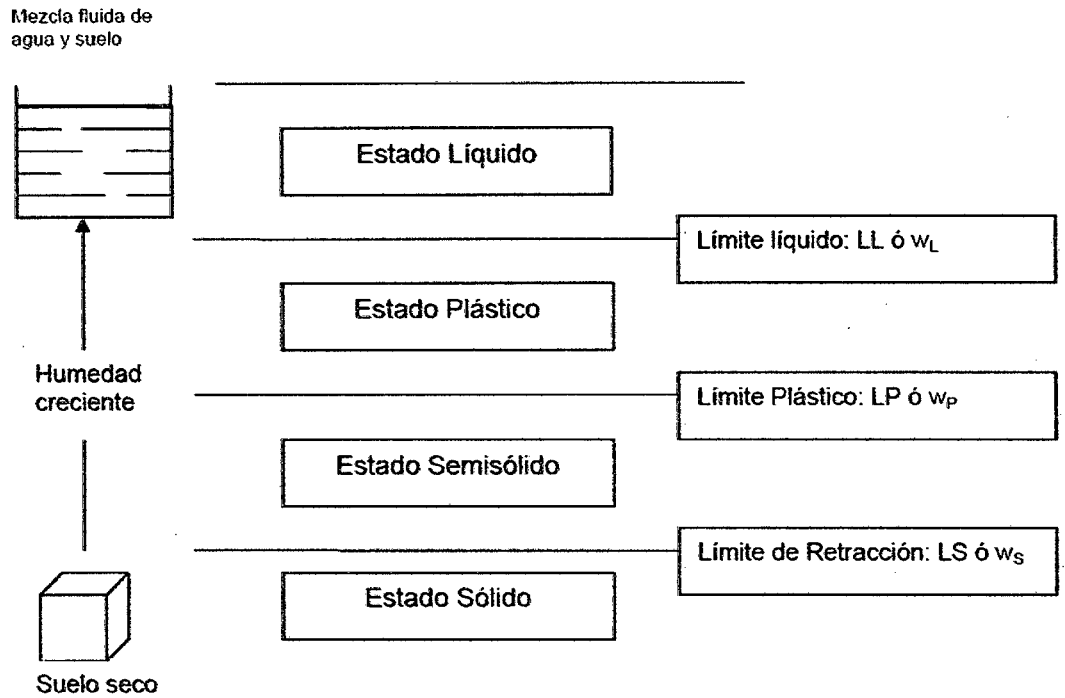


Fig. 6 Comportamiento del suelo al de un líquido (Muelas s.f.).

La determinación de los Límites de Atterberg se lleva a cabo en laboratorio, definiéndose el límite plástico como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 3 mm. de diámetro. El límite líquido se determina con la cuchara de Casagrande.

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como Índice de Plasticidad:

$$IP = LL - LP \quad (15)$$

El índice de liquidez se define como:

$$I_L = \frac{w_n - w_p}{w_L - w_p} \quad (16)$$

El índice de plasticidad indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica, mientras que el índice de liquidez indica la proximidad de la humedad natural del suelo al límite líquido.

Con el fin de proporcionar una representación adecuada de la plasticidad de una muestra de suelo se emplea la denominada Carta de plasticidad de Casagrande (ver figura adjunta).

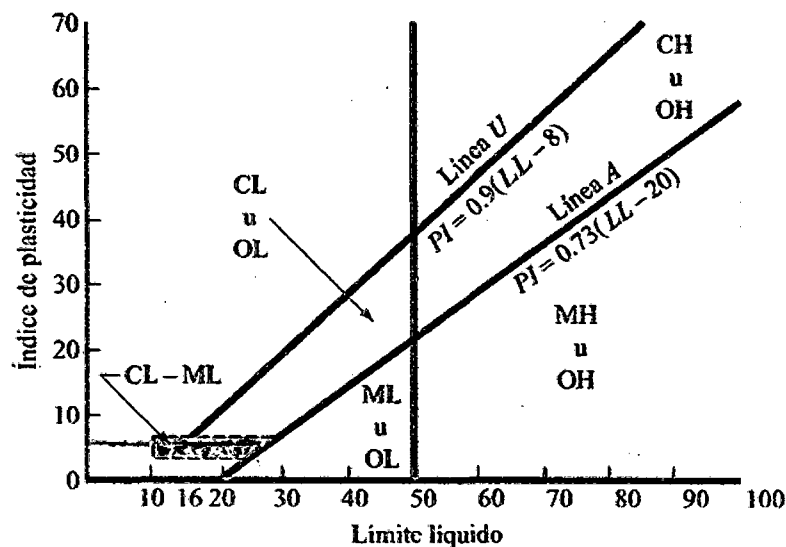


Fig. 7 Carta de plasticidad de Casagrande (Das, 2001)

En este gráfico se representa la relación del límite líquido (abscisas) con el índice de plasticidad (ordenadas). Casagrande definió que los suelos con  $LL > 50$  son de “alta plasticidad” (pueden admitir un mayor contenido de agua y por tanto pueden experimentar deformaciones plásticas mayores). Los suelos con  $LL < 50$  se denominan de “baja plasticidad”. Complementariamente, Casagrande definió una línea A, que separa los suelos arcillosos de los más limosos. Así, a partir del criterio de alta y baja plasticidad y de la línea A, se pueden definir varias zonas en el gráfico anterior. Los suelos limosos y con apreciable contenido orgánico tienen un intervalo de humedad menor para pasar del estado semisólido al estado líquido (menor índice de plasticidad), situándose por debajo de la línea A. En el caso de las arcillas, dicho intervalo de humedad es mayor, situándose por encima de la línea A. Se definen, por tanto, varios tipos de suelos: arcillas de alta plasticidad (CH), arcillas de baja plasticidad (CL), limos y suelos orgánicos de alta plasticidad (MH-OH) y limos y suelos orgánicos de baja plasticidad (ML-OL). (Das, 2001)

#### e) Clasificación de suelos

Con el objeto de dividir los suelos en grupos de comportamiento semejante, con propiedades geotécnicas similares, surgen las denominadas clasificaciones de suelos.

La clasificación de suelos consiste, pues, en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de unas ciertas propiedades

con un grupo de un sistema de clasificación suele ser un proceso empírico puesto a punto a través de muchos años de experiencia. (Das, 2001)

La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan ensayos muy sencillos, para obtener las características del suelo necesarias para poderlo asignar a un determinado grupo. Las propiedades ingenieriles básicas que suelen emplear las distintas clasificaciones son la distribución granulométrica, los Límites de Atterberg, el contenido en materia orgánica, etc. Los dos sistemas principales de clasificación de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el USCS (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de explanadas de carreteras. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) fue propuesto inicialmente por Casagrande en 1942 y después revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos. El sistema USCS clasifica los suelos en base a su granulometría, los Límites de Atterberg y el contenido en materia orgánica. A continuación se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma, así como una descripción de las propiedades esperables de los grupos diferenciados.

Tabla 3 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos tipo grava. (Das, 2001)

Símbolo de grupo	Criterios
CW	Menos de 5% pasa la malla N° 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual que 4; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
GP	Menos de 5% pasa la malla N° 200; no cumple ambos criterios para GW
GM	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (fig. 7) o el índice de palstidicidad menor que 4
GC	MAS de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (fig. 7) índice de plasticidad mayor que 7
GC-GM	MAS de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg caen en el area sombreada marcada CL-ML en la figura 2.12
GW-GM	MAS de 12% pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW Y GM
GW-GM	MAS de 12% pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW Y GC
GP-GM	MAS de 12% pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP Y GM
GP-GC	MAS de 12% pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP Y GC

Tabla 4 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos arenosos. (Das, 2001)

Símbolo de grupo	Criterios
SW	Menos de 5% pasa la malla N° 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual que 6; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
SP	Menos de 5% pasa la malla N° 200; no cumple ambos criterios para SW
SM	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (fig. 7) o el índice de palstidicidad menor que 4
SC	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg se grafican arriba de la línea A (fig. 7) índice de plasticidad mayor que 7
SC-SM	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg caen en el area sombreada marcada CL-ML en la figura 7
SW-SM	Porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW Y SM
SW-SC	Porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW Y SC
GP-GM	Porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP Y SM
GP-GC	Porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP Y SC

Tabla 5 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos. (Das, 2001)

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI > 7$ ; se grafica sobre o arriba de la línea A ( véase zona CL en la Fig. 7)
ML	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI > 7$ ; o se grafica sobre o arriba de la línea A ( véase zona ML en la Fig. 7)
OL	orgánico; $LL - \text{seco en horno} / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$ ; $LL < 50$ ( véase zona OL en la Fig. 7)
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$ ; $PI$ se grafica sobre o arriba de la línea A ( véase zona CH en la Fig. 7)
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$ ; $PI$ se grafica debajo de la línea A ( véase zona MH en la Fig. 7)
OH	orgánico; $LL - \text{seco en horno} / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$ ; $LL \geq 50$ ( véase zona OH en la Fig. 7)
CL-ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada en la figura 7
Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos



CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares ( 35% o menos del total pasa N° 200 )							Materiales Limosos - Arcillosos ( M as del 35% del total pasa N° 200 )				Suelos Orgánicos
Clasificación de Grupo	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6	A - 8
Granulometría	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7					
% que pasa												
N° 10	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 mín	...	...	...	...	...	...	...	...	...
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Límite Líquido	...	...	...	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	41 mín
Índice Plástico	...	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín	11 mín	10 máx.	10 máx.	11 mín	11 mín *	11 mín *
Material Constituyente	Fragmentos de piedra y Arena		Arena Fina	Grava y Arena Limoso o Arcilloso				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos		Turba o Estiércol
Evaluación General	Excelente a Bueno							Bueno a pobre				Malo

\* Ver gráfico; ( El índice plástico del sub-grupo A-7-5 es igual o menor que LL - 30. El índice plástico del sub-grupo A-7-6 es mayor que LL - 30 )  
 Calcular el índice de Grupo con la fórmula empírica :  $( F - 35 ) [ 0,2 + 0,005 ( LL - 40 ) ] + 0,01 ( F - 15 ) ( IP - 10 )$

### **2.2.6 Físico-Química de las arcillas.**

Para entender mejor la respuesta que tendrán los suelos ante una estabilización es necesario conocer los aspectos físico-químicos de estos. De manera general se considera, que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de las 2 micras (0.002 mm) o menores y presentan una actividad eléctrica importante que rige su comportamiento, dada su gran superficie específica en relación con su volumen, y aun con su masa.

En los suelos finos predominan las fuerzas eléctricas y están compuestos predominantemente por minerales cristalinos, algunos de los cuales tienen muy poca actividad superficial por lo que no contribuyen a los efectos conocidos como plasticidad y cohesión, como pueden ser el cuarzo y la calcita por ejemplo.

Los minerales cristalinos cuya actividad superficial es tal que se presenta plasticidad y cohesión, podemos denominarlos como arcillosos, existen aproximadamente 15 minerales de este tipo, pero se pueden agrupar en 3 grupos dominantes, a saber: Caolinita, Montmorilonita e Ilita.

#### **Caolinita**

Debido a que las fuerzas de valencia en los átomos de oxígeno superiores, en la lamina de sílica, se encuentran insatisfechas, así como los espaciamientos que guardan entre si dichos oxígenos, resulta posible que la mencionada lamina se una a los de gibsita.

Se pueden unir láminas de este mismo tipo unas sobre otras para formar cristales de caolín conocidas como Caolinita, siendo las fuerzas que las unen del tipo hidrogeno y desarrolladas entre los iones oxígeno (O-2) y los iones hidroxilo (OH)-1. Esta unión es relativamente fuerte. Si se tienen diferentes estructuras en las láminas, se obtienen diferentes minerales arcillosos con la misma composición de caolín. Aunque las láminas de sílica (fig. 2.2) y gibsita son capaces de extenderse en forma indefinida en la dirección horizontal (de los planos), se ha encontrado que las partículas de caolín, que generalmente son de forma hexagonal, se presentan como partículas planas cuyos radios varían de 0.5 a 1.0 micras. (Fernández 1991)

Debido a que las partículas quedan interrumpidas en sus bordes, se sigue que mientras las cargas eléctricas para una lámina elemental de caolinita son neutras.

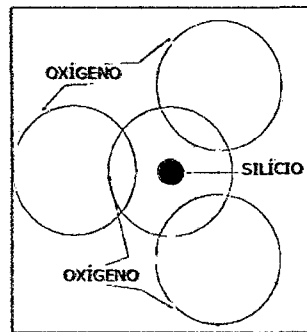


Fig. 8 Esquema de la estructura de la lámina silfca

La caolinita es un mineral eléctricamente neutro, pero bajo la presencia de agua se disocian algunos de los hidroxilos (OH)-1 y pierden los iones hidrogeno (H+), dejando en consecuencia al cristal con una carga residual negativa que se equilibra con la atracción de algunos cationes intercambiables presentes en el agua, por ejemplo, Sodio (Na+) o Calcio(Ca+2). (Fernández 1991)

#### Montmorilonitas.

En las láminas formadas por unidades tetraédricas y octaédricas frecuentemente ocurre lo que se conoce como sustitución isomorfa, que consiste en la sustitución de un átomo por otro. Si el agua contiene cationes tales como Sodio (Na+1), Calcio (Ca+2), Potasio (K+1) o similares, estos son atraídos a las unidades de tal manera que satisfacen casi totalmente a la carga negativa resultante de la solución isomorfa. El problema es que estos cationes no quedan fijos en las láminas si no que se pueden intercambiar fácilmente.

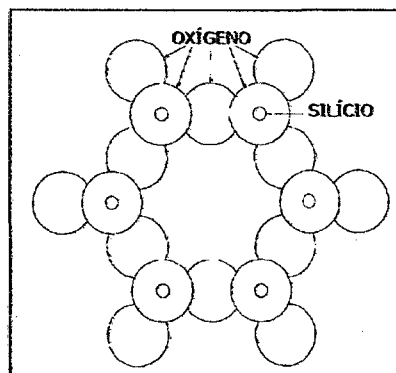


Fig. 9 Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silfca

El espesor de las láminas de la montmorilonita es del orden de 10 Angstroms ( $1 \times 10^{-11}$  m) y se colocan una sobre la otra como las hojas de un libro, teniéndose como liga entre las unidades a las atracciones mutuas de dos láminas hacia los cationes intercambiables anteriormente retenidos.

La unión catiónica en la montmorilonita depende del tipo de catión que se tenga presente, pero en lo general es débil, por lo que el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de montmorilonita, ocasionando que se separen, no siendo difícil desasociar a las unidades estructurales de montmorilonita. Como resultado de lo anterior, los suelos que contengan cantidades considerables de montmorilonita presentan importantes características de expansión. (Fernández 1991)

### **Illitas**

La unidad estructural de la illita es muy semejante a la montmorilonita con la excepción de que siempre se presenta una sustitución isomorfa adicional de átomos de sílice ( $\text{Si}^{+4}$ ) por átomos de aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) en la lámina de sílica (Fig. 10). Resultando con ello una carga residual negativa, más alta que la correspondiente a la de la lámina de montmorilonita. Sin embargo una parte sustancial de esta carga residual negativa se equilibra con cationes de potasio ( $\text{K}^{+1}$ ) no intercambiables, lo que provee una liga fuerte entre las láminas de illita para constituir las partículas.

Las ligas mediante los Cationes no intercambiables ( $\text{K}^{+1}$ ) son más débiles que las ligas de hidrogeno que unen a las unidades estructurales de la caolinita, pero son mucho más fuertes, que las ligas de los cationes intercambiables, que forman a los cristales de la montmorilonita. Esto se debe, en parte, al hecho de que los cationes ( $\text{K}^{+1}$ ) se fijan entre las superficies de las láminas de sílica y en consecuencia se encuentran mucho más cerca del catión intercambiado que en el caso de la montmorilonita en donde el catión intercambiado queda en la lámina central. Debido a esto, la estructura de la illita no se expande por el paso del agua a través de sus láminas como ocurre en la montmorilonita. (Fernández 1991)

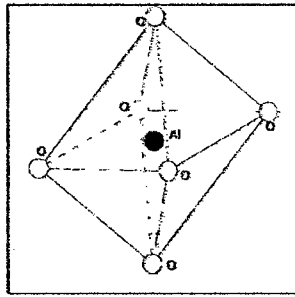


Fig. 10 Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícea

### 2.2.7 Cal

Como término genérico la cal es un producto compuesto de óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio que procede de la calcinación de minerales calizos y dolomíticos.

También suele contener óxidos de silicio, aluminio e hierro en función del material básico de procedencia:



En el proceso de calcinación, los minerales compuestos por carbonatos cálcicos y magnésicos, en proporciones variables según la calidad y tipología del mineral base dan lugar, ante la aplicación de calor, a la formación de óxidos de cal y/o magnesio, que es el producto buscado, con desprendimiento de dióxido de carbono.

Las reacciones químicas siguen el siguiente esquema:



Una característica especial de estos procesos es que la temperatura de la reacción debe ser suficientemente alta para lograr la disociación de los carbonatos. Son así precisas a presión atmosférica temperaturas superiores a 1.300°C que, además, deben prolongarse durante tiempo suficiente para asegurar la reacción. También es importante para la formación de la cal que durante la reacción el dióxido de carbono que se genera pueda ser evacuado.

El producto directamente obtenido de esta reacción es el que se conoce como “cal viva”. Para la consecución de un buen producto es necesario que el mineral de origen sea de gran pureza en cuanto al contenido de carbonatos. Pero evidentemente en el proceso de calcinación influyen otra serie de factores físicos del mineral que deben asegurarse para obtener una calidad adecuada del producto. Estos factores son, fundamentalmente, la granulometría y superficie del mineral expuesto a calcinación, su porosidad y densidad. (Bauzá 2003)

#### **2.2.7.1 Funciones de la cal**

La principal utilidad de las cales se centra en que mezcladas con agua forman una pasta que mejora las características de manejo de los materiales a los que se aplica y, a mayor plazo, aumenta su consistencia y resistencia. El primer fenómeno contribuye a la trabajabilidad de los materiales, morteros y suelos fundamentalmente, mediante la modificación de sus propiedades de plasticidad, capacidad de retención de agua y penetración. En cuanto al segundo fenómeno, se basa en procesos químicos más o menos complejos y diferenciados según el material a que se aplique y el tipo de cal que se emplee. El mecanismo básico consiste en la carbonatación de los hidratos de carbono en contacto con el dióxido de carbono atmosférico, que le lleva a aumentar la resistencia y durabilidad de los materiales. (Bauzá et al 2003)

#### **2.2.7.2 Tipos de cal**

Bauzá (2003) menciona las siguientes Clasificaciones.

Una primera clasificación de los tipos de cal ya se ha citado anteriormente y se basa en la composición del mineral básico que es sometido a calcinación. Así, según la proporción de carbonatos magnésicos en relación con el total de carbonatos, se puede clasificar en:

- **Cales de alto contenido en calcio:** Procedentes de material base de  $\text{CaCO}_3$ , con no más del 5 % de  $\text{MgCO}_3$ . Se componen pues, fundamentalmente de óxidos de calcio
- **Cales dolomíticas:** Procedentes de material base con contenidos de más del 5 % de  $\text{MgCO}_3$ . Se componen de óxidos de calcio y magnesio.

Inicialmente tanto los óxidos de magnesio como los de calcio tienen acciones análogas. No obstante, la diferencia entre ambos tipos puede establecerse en que las cales dolomíticas son menos solubles en el agua y que el fenómeno de la hidratación es más lento en ellas que en las cálcicas. Esto hace que en el empleo de las cales dolomíticas, al aplicarlas en vía acuosa se desprenda menor cantidad de óxido de calcio libre que con las calizas y que la reacción conglomerante perseguida en su aplicación sea más lenta, lo que puede incluso hacerla ineficaz en ciertos usos.

Otra posible clasificación es la que se deduce de los procesos de obtención y materiales de origen. En este sentido se pueden dividir en:

- **Cales hidráulicas:** Obtenidas a partir de calizas que contienen arcillas (sílice y alúmina) por su calcinación y posterior hidratación. Además de hidróxido cálcico incorporan silicatos y aluminatos cálcicos. Tienen propiedades hidráulicas, es decir, endurecen con el agua. El dióxido de carbono atmosférico contribuye a este proceso de endurecimiento adicionalmente.
- **Cales aéreas:** Compuestas de óxido e hidróxido de calcio y magnesio, que endurecen en contacto con el CO<sub>2</sub> del aire. No tienen propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con ella. Se obtienen de rocas calizas con más del 95% de carbonatos.

#### **Presentación de la cal**

Bauzá et al (2003) menciona las siguientes presentaciones

- **Cal apagada,** procedente de la hidratación de la cal viva, compuesta por hidróxidos de calcio/magnesio. Como tal es posible presentarla en forma de pasta, lechada o suspensión de cal en agua, o incluso en forma de polvo seco.
- **Cal viva,** u óxido de calcio/magnesio procedente directamente del proceso de calcinación. Se presenta en forma de grano o molidas en polvo, incluso micronizadas, ya que esta forma supone que no se ha hidratado el producto de la calcinación.

### 2.2.8 Estabilización de suelos

La estabilización de un suelo es el proceso mediante el cual, se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose una capa de asiento del firme estable y durable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas y por ende asegure geotécnicamente el comportamiento de la explanada. (Fernández 1991)

La estabilización del suelo también es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su índice de plasticidad. Las tres formas de lograrlo son: estabilización física, estabilización química y estabilización mecánica.

Para el proceso de estabilización del suelo existente dos opciones de ejecución, mezcla en central o planta móviles y mezcla in situ.

Las propiedades más importantes que se deben mejorar con la estabilización son: (Sherwood, 1992):

Resistencia. El incremento de resistencia aumenta la estabilidad y la capacidad de carga.

- Estabilidad del volumen. Proporciona el control de los procesos de hinchamiento-colapso causados por los cambios de humedad.
- Durabilidad. Una mayor durabilidad aumenta la resistencia a la erosión, responde de manera más eficaz a los cambios climáticos y al uso del tráfico.
- Permeabilidad. La reducción de la permeabilidad y por lo tanto de la circulación de agua, mejora la estabilidad.

La ejecución de un suelo estabilizado in situ incluye las siguientes operaciones:

- Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.
- Preparación de la superficie existente.
- Disgregación del suelo.
- Humectación o desecación del suelo.



- Distribución de la cal o del cemento.
- Ejecución de la mezcla.
- Compactación.
- Terminación de la superficie.
- Curado y protección superficial.

### **2.2.9 Tipos de estabilización.**

#### **2.2.9.1 Estabilización física.**

Se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo.

Hay varios métodos como lo son:

**Mezclas de Suelos:** este tipo de estabilización es de amplio uso pero por si sola no logra producir los efectos deseados, necesiándose siempre de por lo menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que les permite soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como capa de asiento del firme de una carretera ya que, al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas. (Bauzá 2003)

- Geotextiles
- Vibroflotación (Mecánica de Suelos)
- Consolidación Previa

### 2.2.9.2 Estabilización química.

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

Dentro de este grupo de estabilización, las sustancias químicas más comunes son: cal y cemento.

**Cal:** disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.

**Cemento portland:** aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.

Otros productos también utilizados son:

**Productos Asfálticos:** es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.

**Cloruro de sodio:** impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

**Cloruro de calcio:** impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

**Escorias de fundición:** se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

**Polímeros:** este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

**Caucho de Neumáticos:** este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil. (Bauzá 2003)

### 2.2.9.3 Estabilización mecánica.

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.

Compactación: esta mejora generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas. (Bauzá 2003)

#### **2.2.10 Estabilización 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 (Figura 17). (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

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 -75µm- y un Índice de Plasticidad mayor que 10) se consideran buenos candidatos para la estabilización. Los suelos que contienen cantidades significativas de material orgánico (mayor que 1 por ciento) o sulfatos (mayor que el 0.3 por ciento) pueden requerir cal adicional y/o procedimientos de construcción especiales. (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

**Subrasante** (o subbase): La cal puede estabilizar permanentemente el suelo fino empleado como una subrasante o subbase, para crear una capa con un valor estructural significativo en el sistema del pavimento. Los suelos tratados pueden ser del lugar (subrasante) o bien, de materiales de préstamo. La estabilización de la subrasante por lo general implica mezcla en el lugar y generalmente requiere la adición de cal de 3 a 6 por ciento en peso del suelo seco.<sup>1</sup>

**Bases:** La cal puede estabilizar permanentemente materiales que no cumplen con las características mínimas para funcionar como una base (como la grava con arcilla, gravas "sucias", o bases contaminadas en general) que contienen al menos el 50 por ciento de material grueso retenido en la malla o tamiz No. 4. La estabilización de bases es utilizada para la construcción de caminos nuevos y para la reconstrucción de caminos deteriorados, y generalmente requiere la adición de 2 a 4 por ciento de cal respecto al peso del suelo seco. La mezcla en el lugar se usa comúnmente para la estabilización de

---

<sup>1</sup> Los porcentajes de cal a utilizar deben ser determinados por un Ingeniero, utilizando un diseño de mezcla y un protocolo de prueba.

bases, sin embargo, la mezcla en planta también puede ser utilizada. La cal también se usa para mejorar las características de las mezclas de suelo y agregados en "el reciclaje de espesor completo". (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

#### **2.2.10.1 Modificación con cal y secado de suelos**

Existen otros dos tipos importantes de tratamiento con cal utilizado en operaciones de construcción: (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

**Primero**, debido a que la cal viva se combina químicamente con el agua, puede ser usada con eficacia para secar suelos mojados. El calor generado por esta reacción también contribuye a secar los suelos mojados. La reacción con el agua ocurre incluso si los suelos no contienen fracciones arcillosas significativas. Cuando las arcillas están presentes, la reacción química de la cal con las arcillas, seca aún más los suelos. El efecto neto es que el secado ocurre rápidamente, dentro de un lapso de horas, permitiendo al contratista compactar el suelo mucho más rápidamente que si esperara que el suelo se secase por la evaporación natural.

El secado del suelo húmedo en obras de construcción es uno de los usos más amplios de la cal para el tratamiento de suelos. La cal puede ser utilizada para uno o varios de los siguientes casos: ayudar a la compactación, secar las áreas húmedas; mejorar la capacidad soporte; proporcionar una plataforma de trabajo para la construcción subsiguiente; y acondicionar el suelo (hacerlo trabajable) para una posterior estabilización con cemento Portland o con asfalto. Generalmente, entre 1 y 4 por ciento de cal secará un sitio mojado suficientemente para permitir que procedan las actividades de construcción.

**Segundo**, el tratamiento con cal puede mejorar considerablemente la trabajabilidad y la resistencia a corto plazo del suelo, de tal forma que permite que los proyectos puedan ser ejecutados más fácilmente. Los ejemplos incluyen tratamiento de suelos finos o materiales de base granular para construir caminos temporales u otras plataformas de construcción. Típicamente se utiliza del 1 al 4 por ciento de cal en peso con respecto al suelo para la modificación, que es generalmente una menor cantidad que la utilizada para la estabilización permanente de suelos. Los cambios hechos al suelo modificado con cal pueden o no ser permanentes. La diferencia principal entre la modificación y la estabilización es que, con la modificación, generalmente no se le concede ningún

crédito estructural a la capa modificada con cal en el diseño de pavimento. La modificación con cal trabaja mejor en suelos arcillosos.

### **2.2.11 Estabilización de subrasante (o subbase) con cal.**

#### **2.2.11.1 Escarificación y pulverización inicial**

La subrasante puede ser escarificada a la profundidad y ancho especificados (Figura 18) y luego pulverizarse parcialmente. Es deseable remover los materiales que no sean suelos y que sean mayores que 3 pulgadas, como troncos, raíces, césped y piedras. (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

Una subrasante escarificada o pulverizada ofrece más área de contacto superficial de suelo para la cal en el momento de la aplicación.

En el pasado era una práctica común escarificar antes de la aplicación. Hoy en día, debido a la disponibilidad de mezcladores superiores, la cal a menudo es aplicada sin la escarificación. Los camiones de cal también pueden transitar la carretera con más facilidad si está compactada, más bien que escarificada, en particular sobre suelos mojados. La principal desventaja de este procedimiento, sin embargo, se da por factores meteorológicos; cuando la cal es colocada sobre una superficie lisa, hay mayor posibilidad para la pérdida debido al viento y al proceso, particularmente si la mezcla no se realiza de inmediato. Para eliminar la pérdida hacia los lados, se puede construir un pequeño camellón, utilizando material del camino (Figura 19).

Si la cal viva se descarga en “volcanes”, es deseable una superficie lisa, de modo que se alcance una aplicación uniforme con la hoja de la motoniveladora. Por lo anterior, el suelo no debería ser escarificado antes de que la cal viva sea aplicada de esta manera. (Bauzá 2003)

**Equipo:** motoniveladora con escarificador o escarificador de discos; estabilizadora de suelos para pulverización inicial.

#### **2.2.11.2 Aplicación de la cal viva**

Existen dos formas en que la cal viva seca puede ser aplicada. La primera, los camiones auto descargables o tráiler pueden distribuir la cal viva neumática o mecánicamente a la anchura completa del camión. Debido a que el flujo de cal viva granular y sin triturar es

más controlable que el de la cal hidratada, resulta una práctica común usar camiones con aplicadores incorporados. (Bauzá 2003)

Para el empleo de una barra de extensión neumática, la cal viva se muele ( $\frac{1}{4}$  " por 0) para fluir libremente. Aplicador mecánico sobre la parte posterior de un camión o tráiler, o una caja separada puede manejar la cal viva menos fina - comúnmente hasta  $\frac{1}{2}$  " de diámetro. La súbbase puede ser escarificada para este tipo de uso. Este uso trabaja bien en condiciones de suelo muy mojadas.

Para asegurar que se aplica la cantidad correcta de cal, se puede colocar sobre el suelo una bandeja o un paño de área conocida, entre las ruedas del camión que esparce la cal. La bandeja o paño, donde se recolectó la cal, se pesa para verificar que la cantidad de cal es la correcta. (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

Otro método para aplicar la cal viva, es por gravedad, dejándola caer formando un camellón. Es usual utilizar camiones graneleros con sistemas de compuertas inferiores neumáticas. Una motoniveladora se utiliza, ocasionalmente, para esparcir la cal viva. Se puede utilizar cal hasta un tamaño de  $\frac{3}{4}$ ". Este método requiere que el área sea nivelada y esté suficientemente seca, para que el suelo no se ahuelle bajo las llantas del camión, lo que evitaría la extensión uniforme. Es difícil de medir la proporción de aplicación de cal cuando se extiende utilizando una motoniveladora. El mejor método es marcar un área en la cual se extenderá una cantidad conocida de cal y observar la motoniveladora para asegurar que es extendida uniformemente. (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

### **2.2.11.3 Aplicación de la cal hidratada seca**

La cal hidratada debe ser uniformemente extendida en el porcentaje especificado desde camiones adecuadamente equipados. Un aplicador aprobado es preferible para la distribución uniforme. La cantidad de cal hidratada seca puede ser medida usando el mismo método que descrito encima para la cal viva.

La cal hidratada seca no debería ser extendida en condiciones de viento debido al polvo excesivo. En condiciones de viento, en áreas pobladas, o en zonas adyacentes al tráfico de vehículos pesados, la aplicación de lechada o una aplicación adecuada de cal viva pueden reducir al mínimo los problemas relacionados con el polvo.

Equipo para aplicación de cal hidratada seca: Para envíos en camión, los camiones con tanques auto descargables son los más eficientes para transportar y esparcir la cal porque no se requiere ningún manejo adicional. La descarga se realiza neumáticamente o por uno o varios transportadores de tornillo. La extensión puede ser lograda por una paleta mecánica colocada en la parte posterior u otros dispositivos.

Si se utiliza transporte de palangana, los mismos deben ser cubiertos para prevenir el polvo durante el viaje al lugar de aplicación y durante la extensión de la cal. La extensión, al utilizar transporte de palangana, deberá realizarse ajustándole un esparcidor mecánico en la parte posterior. No se recomienda descargar la cal en solo “volcán” para realizar posteriormente la extensión con motoniveladora.

#### **2.2.11.4 Aplicación de la Lechada de cal**

En este uso, el suelo generalmente es escarificado y la lechada se aplica con camiones distribuidores (Figura 20). Debido a que la cal en la forma de lechada está menos concentrada que la cal seca, a menudo se requiere dos o más pasadas para proporcionar la cantidad especificada de sólidos de cal. Para prevenir la pérdida y la consecuente no uniformidad en la distribución de cal, la lechada se mezcla con el suelo inmediatamente después de cada pasada.

La proporción real utilizada depende del porcentaje de cal especificada para el tipo de suelo, y el porcentaje de sólidos de cal en la lechada. Los sólidos en la lechada generalmente están en el rango entre 30 y 35 por ciento, aunque existe la tecnología para aumentar los sólidos arriba del 40 por ciento para reducir el número de pasadas de por los camiones esparcidores. Los sólidos contenidos en la lechada (y, por consiguiente, la cantidad de cal disponible) pueden ser fácilmente medidos en los tanques de mezcla o en los camiones, utilizando un dispositivo de gravedad específica. Una vez que se conoce el contenido de sólidos de la lechada, las cargas pueden ser extendidas sobre áreas de extensión conocida para asegurar la cantidad correcta de aplicación.

Equipo para aplicación de la lechada: Se recomiendan camiones distribuidores con recirculación, capaces de mantener la lechada en la suspensión. Si el tiempo de viaje es corto, se pueden utilizar camiones sin bombas de recirculación. La extensión desde los camiones de tanque se lleva a cabo por gravedad o por barras de rocío a presión. Los

distribuidores de presión son preferidos porque ellos proporcionan una aplicación más uniforme.

#### **2.2.11.5 Mezcla preliminar y aplicación de agua**

Se requiere una mezcla preliminar para distribuir la cal dentro del suelo y para pulverizar inicialmente el suelo para preparar la adición de agua que inicie la reacción química para la estabilización. Esta mezcla puede iniciar con la escarificación. La escarificación puede realizarse aún sin mezcladoras modernas. Durante este proceso o inmediatamente después, el agua deberá agregarse. (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

#### **2.2.11.6 Período de fraguado**

La mezcla de suelo y cal debería fraguar suficientemente para permitir la reacción química que cambia las propiedades del material. La duración de este período de fraguado debería basarse en el juicio de ingeniería y depende del tipo de suelo. El período de fraguado, comúnmente, es de 1 a 7 días. Después del fraguado, el suelo deberá ser mezclado, de nuevo, antes de la compactación. Para suelos con Índice de Plasticidad bajos, o cuando el objetivo es el secado o la modificación, por lo general, el fraguado no es necesario. (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

#### **2.2.11.7 Mezcla final y pulverización**

Para alcanzar la estabilización completa, es esencial una adecuada pulverización final de la fracción arcillosa y la completa distribución de la cal dentro del suelo. La mezcla y la pulverización deberían continuar hasta que el 100 por ciento de material pase el tamiz de 1 pulgada y al menos el 60 por ciento de material pase el tamiz No. 4.

### **2.3 Definición de términos básicos.**

- **Límite líquido.** El límite líquido se define como el contenido de humedad con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De esta forma, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte y según Atterberg es de 25 g/cm<sup>2</sup>.
- **Límite plástico.** Es el contenido de humedad, expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos



cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico. El límite plástico se determina con el material sobrante del límite líquido y al cual se le evapora humedad por mezclado hasta obtener una mezcla plástica que sea moldeable. Se forma una pequeña bola que deberá rodillarse enseguida aplicando la suficiente presión a efecto de formar filamentos.

- **Prueba Proctor.** La prueba Proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por el procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad.
- **Prueba Proctor estándar.** Esta prueba tiene como finalidad determinar el peso volumétrico seco máximo de compactación Proctor y la humedad óptima en los suelos con material mayor de 3/8" y los cuales no se les puede hacer la prueba Proctor. Esta prueba sirve también para determinar la calidad de los suelos en cuanto a valor de soporte se refiere, midiendo la resistencia a la penetración del suelo compactado y sujeto a un determinado periodo de saturación.
- **Prueba Proctor modificado.** Aplica mayor energía de compactación que el estándar siendo el que está más de acuerdo con las solicitaciones que las modernas estructuras imponen al suelo.
- **Valor relativo de soporte.** Es un índice de resistencia al esfuerzo cortante en condiciones determinadas de compactación y humedad de los suelos de subrasante y de las capas de subbase, base y afirmado de un pavimento.
- **Subrasante.** se define así al terreno de fundación de los pavimentos, pudiendo estar constituida por el suelo natural del corte o de la parte superior de un relleno debidamente compactado.
- **Estabilización de suelos.** proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.
- **Suelo arcilloso.** El suelo arcilloso es aquél en el que predomina la arcilla sobre otras partículas de otros tamaños. La arcilla es un conjunto de partículas minerales

muy pequeñas, de menos de 0,001 mm. de diámetro, en contraposición a otras partículas más grandes como son el limo y la arena, por orden de tamaño, de menor a mayor.

- **Cal.** Es un término que designa todas las formas físicas en las que pueden aparecer el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y el óxido de calcio y magnesio ( $\text{CaMgO}$ ). Estos productos se obtienen como resultado de la calcinación de las rocas (calizas o dolomías).

## CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Tipo, niveles, diseño y método de investigación

Tabla 7 Diseño y método de investigación

Criterio	Tipo de investigación
Finalidad	Aplicada
Estrategia	Cuantitativa
Objetivos	Explicativa, experimental
Fuente de datos	Primaria
Diseño de prueba de la hipótesis	Experimental
Temporalidad	Transversal
Contexto donde se desarrolla	Laboratorio, gabinete
Intervención disciplinaria	Unidisciplinaria

Es de conocer para cualquier ingeniero geotécnista que, para cualquier diseño o aprovechamiento de un suelo es de suma importancia su clasificación y dependiendo de los resultados que se quiera obtener serán las pruebas que se le estudiará a dicho suelo. Así, no son las mismas pruebas que se someterá a un suelo para su utilización como capa sub-rasante o subyacente, a otro material que vaya a utilizarse como pétreo en una losa de concreto hidráulico o a otro material que se utilice en un suelo-cemento. Se hace necesario pues definir los procedimientos y los estudios que se tendrán que realizar para cada fin en específico.

A continuación se presentan los procedimientos empleados en este estudio para la clasificación del suelo, obtener sus características mecánicas e ingenieriles, y su posterior mezclado con el material estabilizante, que en este caso es la cal.

Cabe aclarar que no es un diseño de una estabilización, se trata de un estudio del comportamiento del material presente en el lugar al adicionarle el material estabilizante determinadas en pruebas de laboratorio que se detallan en este capítulo.

### 3.1.1 Población de estudio

La población está conformada por suelos arcillosos de alta y baja plasticidad del acceso al centro comercial open plaza del distrito de Cajamarca

### 3.1.2 Muestra

La muestra de suelo arcilloso de alta plasticidad es proveniente del acceso al centro comercial open plaza con la cual elaboramos ensayos adicionándole porcentajes de cal de 0%, 2%, 4% y 6% tal y como se muestra en la tabla 8, donde M0, M2, M4, M6 son las muestras a ensayar con los diferentes porcentajes de cal respectivamente.

Tabla 8 Cantidad de muestra a ensayar

Cod.	Var.	M0	M2	M4	M6	Parcial
Especímenes Limite líquido y plástico.		5	5	5	5	20
Especímenes Densidad seca máxima		1	1	1	1	4
Especímenes CBR		1	1	1	1	4
Total de ensayos						28

### 3.1.3 Unidad de análisis

Espécimen de suelo arcilloso con porcentaje de cal.

### 3.1.4 Técnicas e instrumentos de recolección

Tabla 9 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Variables	Recolección de datos		
	Fuente	Técnica	Instrumento
Límites de Atterberg	Primaria o directa	Observación directa	Límite líquido. <b>ASTM D 4318, AASHTO T89</b>
			Límite plástico. <b>ASTM D 4318-84, AASHTO T190</b>
Densidad máxima seca	Primaria o directa	Observación directa	Proctor modificado <b>AASHTO T180-01 T180, ASTM D 1557</b>
Valor relativo de soporte	Primaria o directa	Observación directa	<b>AASHTO T190, ASTM D1883</b>

### 3.1.5 Ubicación geográfica donde se realiza la investigación

El presente estudio lo realizaremos en la ciudad de Cajamarca.

Tabla 10 Coordenadas Cajamarca

Lugar	Coordenadas UTM		
	Este	Norte	Cota
Cajamarca	774618.00 m	9207527.00 m	2720 m.s.n.m

El suelo arcilloso que utilizaremos en nuestro estudio pertenece a la subrasante del acceso al centro comercial open plaza ubicada al Este y a 15 minutos del centro de la ciudad de Cajamarca.

Sus coordenadas UTM son:

Tabla 11 Ubicación del suelo arcilloso

Lugar	Coordenadas UTM		
	Este	Norte	Cota
Open Plaza - Cajamarca	775510.00 m	9208737.00 m	2700 m.s.n.m



Fig. 1 Ubicación Centro Comercial Open Plaza (Google Earth)

### 3.2 Procedimiento

#### 3.2.1 Materiales a utilizar

- Suelo arcilloso de la subrasante del acceso al centro comercial open plaza.
- Cal hidratada.
- Agua potable.

### **3.2.2 Equipos a utilizar**

- Tamices: para análisis granulométrico mediante tamizado por lavado (ASTM D421)
- Balanzas electrónicas digitales.
- Estufa con control de temperatura.
- Taras de todos los tamaños.
- Moldes de Proctor modificado.
- Martillo de 10 lb.
- Moldes para ensayo CBR.
- Equipo para ensayo CBR.

### **3.2.3 Ensayos para el suelo arcilloso con adición de cal al 0%**

#### **3.2.3.1 Determinación contenido de humedad (W%)**

**Referencias: ASTM D2216 – 92, MTC E 108 – 199, NTP 339 – 127**

Material:

- Muestra alterada extraída del suelo en estudio.

Equipos:

- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Estufa con control de temperatura
- Taras

Procedimiento

- Se pesó la tara (Wt).
- Se pesó la muestra húmeda más la tara (Wh+t)
- Se secó la muestra en la estufa, durante 24 horas a 105° C.
- Se pesó la muestra más la tara (Ws+t).

- Se determinó el peso del agua  $W_w = (W_{h+t}) - (W_{s+t})$ .
- Se determinó el peso de la muestra seca  $W_s = (W_{s+t}) - (W_t)$ .
- Se determinó el contenido de humedad  $W\% = W_w/W_s * 100$

Ver Tabla 18

### 3.2.3.2 Análisis granulométrico mediante tamizado por lavado.

**Referencias: ASTM D421**

Material:

- Muestra seca aproximadamente 200 gr. (material arcilloso).

Equipos:

- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Juego de tamices
- Estufa con control de temperatura
- Taras

**Procedimiento**

- Se secó la muestra.
- Se pesó la muestra seca ( $W_s$ )
- Colocando la muestra en un recipiente, se cubrió con agua y se dejó durante algunas horas.
- Se tamizó la muestra por la malla N° 200 mediante chorro de agua.
- La muestra retenida en la malla N° 200 se retiró en un recipiente y se dejó secar.
- Se pasó la muestra seca por el juego de tamices, agitando en forma manual.



- Se Calculó los porcentajes de los pesos retenidos en cada tamiz (% RP)

$$\% RP = PRP/W_s * 100$$

- Se calculó los porcentajes retenidos acumulados en cada tamiz %RA, para lo cual se sumaran en forma progresiva los %RP.
- Se Calculó los porcentajes acumulados que pasan en cada tamiz.
- Se Dibujó la curva granulométrica en escala semilogarítmica.

Ver Tabla 19

### 3.2.3.3 Límite líquido 0% de cal.

**Referencias: ASTM D4318, AASHTO T89, MTC E110-199, NTP 339-130.**

Material:

- Muestra seca que pasa tamiz N°40.

Equipos:

- Tamiz N°40
- Copa Casagrande.
- Ranurador o acanalador
- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Estufa con control de temperatura
- Espátula
- Probeta de 100 ml.
- Capsula de porcelana.
- Taras identificadas.

Procedimiento

- En una capsula de porcelana se mezcló el suelo con agua mediante una espátula hasta obtener una pasta uniforme.
- Se Colocó una porción de la pasta en la copa de Casagrande, nivelar mediante la espátula hasta obtener un espesor de 1cm.
- En el centro se realizó una ranura con el acanalador de tal manera que la muestra quedó dividida en dos partes.
- Se Elevó y dejó caer la copa mediante la nivela a razón de 2 caidas por segundo hasta que las dos mitades de suelo se pongan en contacto con la parte inferior de la ranura y a lo largo de 1.27 cm., se registró el número de golpes.
- Mediante la espátula se retiró la porción de suelo que se ha puesto en contacto en la parte inferior de la ranura y se colocó en una tara para determinar su contenido de humedad.
- Se retiró el suelo remanente de la copa Casagrande y colocar en la capsula de porcelana, agregamos agua si el número de golpes del ensayo anterior ha sido alto, y agregamos suelo si el número de golpes ha sido bajo. (el número de golpes debe estar comprendido entre 6 y 35).
- Se Repitió el ensayo dos veces más.
- Dibujamos la curva de fluidez (la recta) en escala semilogarítmica, en el eje de las abscisas se registró el número de golpes en escala logarítmica, en el eje de ordenadas los contenidos de humedad en escala natural.
- Se determinó la orden correspondiente a los 25 golpes en la curva de fluidez, este valor será el límite líquido del suelo.

Ver Tabla 20

#### **3.2.3.4 Límite plástico 0% de cal.**

**Referencias: ASTM D4318, AASHTO T90, MTC E111-199.**

Material:

- Muestra seca una porción.

Equipos:

- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Estufa con control de temperatura.
- Espátula.
- Capsula de porcelana.
- Placa de vidrio.
- Taras identificadas.

Procedimiento

- A la porción de la mezcla preparada para el límite líquido se agregó suelo seco de tal manera que la pasta baje su contenido de humedad.
- Se enrolló la muestra con la mano sobre una placa de vidrio hasta obtener cilindros de 3 mm. De diámetro y que presenten agrietamientos, determinamos su contenido de humedad.
- Se repitió el ensayo una vez más.
- El límite plástico es el promedio de los dos valores de contenidos de humedad.

Ver Tabla 21

**3.2.3.5 Compactación Proctor modificado 0% de cal**

**Referencias: ASTM D 1557, AASHTO T180, MTC E115-199.**

Material:

- Muestra alterada seca.
- Papel filtro.

### Equipos:

- Equipo proctor modificado.
- Pisón proctor modificado.
- Balanza con aproximación de 1 gr
- Estufa con control de temperatura.
- Espátula.
- Probeta de 1000 ml.
- Recipiente de 6 kg. De capacidad.
- Taras identificadas.

### Procedimiento

- Se preparó la muestra seca para el ensayo, método utilizado: método A
- Se preparó 5 muestras con una determinada cantidad de agua de tal manera que el contenido de humedad de cada una de ellas varió aproximadamente en 1 ½ % entre ellas.
- Se Ensambló el molde cilíndrico con la placa de base y el collar de extensión y el papel filtro.
- Se compactó cada muestra en 5 capas y cada capa con 25 golpes, al terminar de compactar la última capa, se retiró el collar de extensión, se enrasó con la espátula y se determina la densidad húmeda (Dh).
- Se determinó el contenido de humedad de cada muestra compactada (W%), utilizando muestras representativas de la parte superior e inferior.
- Se determinó la densidad seca de cada muestra compactada (Ds).

$$Ds = Dh / (1 + w\%/100)$$

- Se Dibujó la curva de compactación en escala natural, los datos de contenido de humedad se registró en el eje de las abscisas y los datos de densidad seca en el eje de ordenadas.
- Se Determinó la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad.

Ver Tabla 23

### **3.2.3.5 Ensayo CBR en laboratorio 0% de cal.**

**Referencias: ASTM D 1883, ASTM D4429-93, AASHTO T190**

Material:

- Muestra alterada seca.
- Papel filtro.

Equipos:

- Equipo CBR (3 moldes cilíndricos con placa de base y collar de extensión, 3 discos espaciadores, 3 placas de expansión, e sobrecarga cada una de 4.5 kg. de peso y 3 trípodes)
- Pisón Proctor modificado.
- Balanza con aproximación de 1 gr
- Estufa con control de temperatura.
- Espátula.
- Probeta de 1000 ml.
- Recipiente de 6 kg. De capacidad.
- Taras identificadas.

Procedimiento

Consta de 3 fases: ensayo de compasión CBR, ensayo de hinchamiento y ensayo carga – penetración.

#### A. Ensayo de compactación CBR.

- Se Preparó la muestra con el contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo de compactación Proctor modificado.
- Se ensambló los moldes cilíndricos con sus placas de base, collares de extensión, discos espaciadores y papeles filtro.
- Se Compactó la muestra en los 3 CBR en cada uno de ellos en 5 capas, el primero con 12 golpes, el segundo con 25 golpes y el tercero con 56 golpes por capa.
- Se determinó la humedad de las muestras de cada molde.
- Se determinó la densidad seca de las muestras de cada molde.

#### B. Ensayo de hinchamiento

- Se Invertió 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.
- Se colocó sobre cada muestra el papel filtro, la placa de expansión, la sobrecarga, el trípode y el dial de expansión.
- Se colocó los tres moldes debidamente equipados en un tanque de agua durante 4 días (96 horas), registrar las lecturas de expansión cada 24 horas.

#### C. Ensayo de carga – penetración.

- Después de los 4 días se retiró los moldes del tanque, se dejó drenar durante 15 minutos.
- Se Colocó la sobrecarga en cada molde, llevamos a la prensa hidráulica, se procedió el ensayo de penetración aplicando un pisón a una velocidad de

0.05 pulg/min., registramos las lecturas de carga y de penetración de cada muestra.

- Se determinó nuevamente la densidad humedad y el contenido de humedad de las muestras de cada molde.
- Se Dibujó las 03 curvas esfuerzos – deformación correspondientes a las muestras de cada molde, en escala natural, los valores de la penetración se registró en el eje de las abscisas y los valores de los esfuerzos en el eje de las ordenadas. (algunas veces es necesario corregir las curvas y cambiar el origen de las coordenadas.
- Se Determinó los esfuerzos correspondientes a 0.1 y 0.2 de penetración de cada una de las curvas esfuerzo – deformación.
- Se determinamos los índices CBR para 0.1 y 0.2 de penetración, los cuales se obtienen dividiendo cada valor correspondiente a 0.1” y 0.2” de la muestra ensayada entre el esfuerzo correspondiente a 0.1” y 0.2” de la muestra ensayada entre el esfuerzo patrón correspondiente a 0.1” y 0.2” de la muestra ensayada entre el esfuerzo patrón correspondiente a 0.1” y 0.2”.

$$CBR = \frac{\sigma_t}{\sigma_p} * 100$$

*$\sigma_t$ : esfuerzo de la muestra ensayada*

*$\sigma_p$ : esfuerzo patron*

- Se Dibujó las dos curvas densidad seca versus CBR correspondientes a 0.1” y 0.2” de penetración.
- El índice CBR de diseño es el menor valor obtenido correspondiente al 95% de densidad seca máxima.

Ver Tabla 24, 25, 26

#### **3.2.4 Ensayos para el suelo arcilloso con adición de 2%, 4% y 6% de cal**

Los procedimientos fueron los mismos realizados en el acápite 3.2.3, **Ensayos para el suelo arcilloso con adición de cal al 0%**, con la diferencia que las muestras fueron alteradas con la adición de cal hidratada en sus diversos tratamientos.

La mezcla de los diferentes porcentajes de cal se realizó manualmente y los porcentajes de cal están consideradas en peso de la muestra seca.

Los cálculos de los ensayos se presentan en la sección de anexos para la los diferentes tratamientos.



## CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Resultados

La clasificación se hizo mediante la clasificación SUCS y AASHTO según tabla 3 y tabla 5 respectivamente:

Tabla 12 Resultados de ensayos del suelo con cal al 0%

Límite Líquido (%)	67.57
Límite Plástico (%)	30.70
Índice de Plasticidad Ip (%)	36.87
Clasificación SUCS	CH
Clasificación AASHTO	A-7-5(29)
Proctor modificado	
Dsmáx	1.69 gr/cm <sup>3</sup>
Wop	16.8%
Ensayo CBR	
Dsmáx	1.69 gr/cm <sup>2</sup>
95% Ds Máx	1.61 gr/cm <sup>3</sup>
CBR de diseño	2.55%

Tabla 13 Resultados de ensayos del suelo con cal al 2%

Límite Líquido (%)	63.49
Límite Plástico (%)	32.05
Índice de Plasticidad Ip (%)	31.44
Proctor modificado	
Dsmáx	1.65 gr/cm <sup>3</sup>
Wop	20.81%
Ensayo CBR	
Dsmáx	1.65 gr/cm <sup>2</sup>
95% Ds Máx	1.57 gr/cm <sup>3</sup>
CBR de diseño	7.50%

Tabla 14 Resultados de ensayos del suelo con cal al 4%

Límite Líquido (%)	57.15
Límite Plástico (%)	47.60
Índice de Plasticidad Ip (%)	9.56
Proctor modificado	
Dsmáx	1.59 gr/cm3
Wop	20.50%
Ensayo CBR	
Dsmáx	1.59 gr/cm2
95% Ds Máx	1.51 gr/cm3
CBR de diseño	11.48%

Tabla 15 Resultados de ensayos del suelo con Cal al 6%

Límite Líquido (%)	56.69
Límite Plástico (%)	47.46
Índice de Plasticidad Ip (%)	9.23
Proctor modificado	
Dsmáx	1.55 gr/cm3
Wop	22.20%
Ensayo CBR	
Dsmáx	1.55 gr/cm2
95% Ds Máx	1.47 gr/cm3
CBR de diseño	10.75%

## 4.2 Análisis de resultados.

### Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Tabla 16 Resumen Límite líquido, plástico e índice de plasticidad

% de Cal	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	% que decae IP
0%	67.57	30.7	36.87	
2%	63.49	32.05	31.44	14.73
4%	57.15	47.6	9.56	74.07
6%	56.69	47.46	9.23	74.97

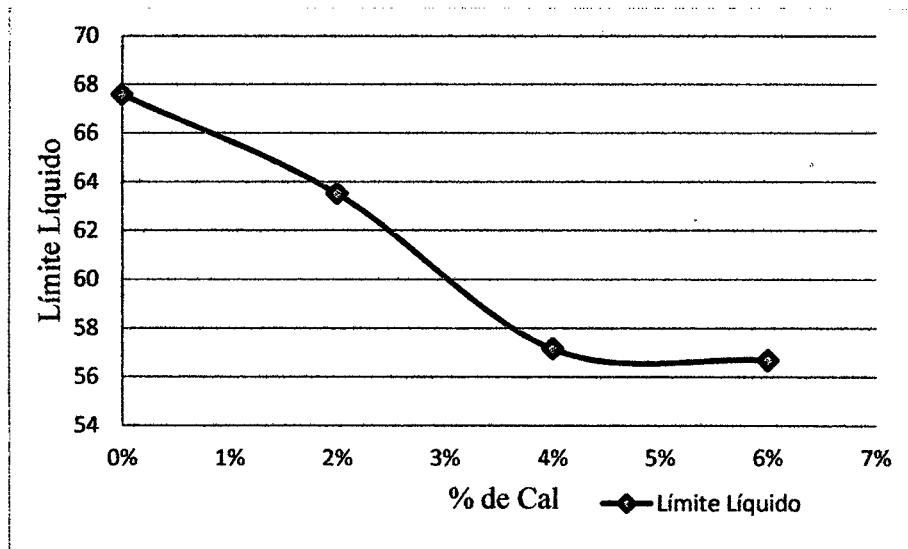


Fig. 11 Comportamiento del límite líquido sobre los porcentajes de cal.

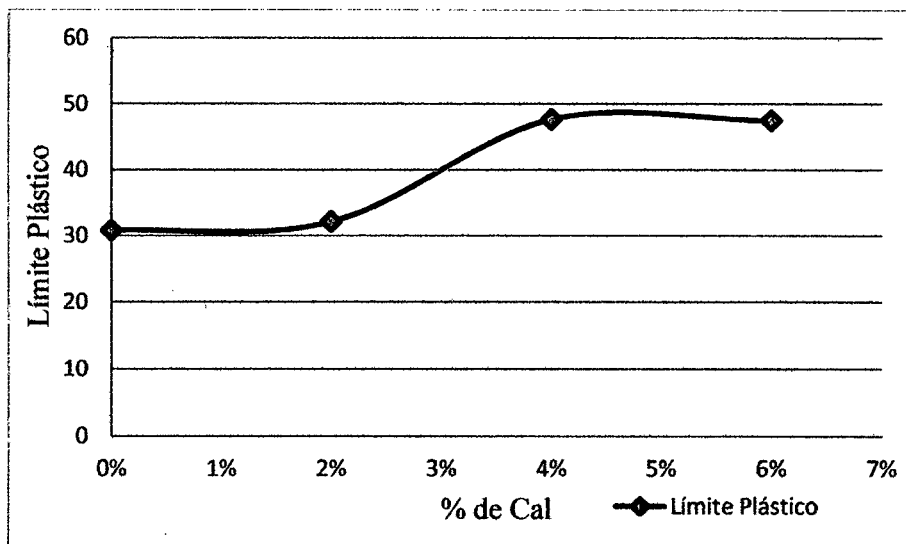


Fig. 12 Comportamiento del límite plástico sobre los porcentajes de cal.

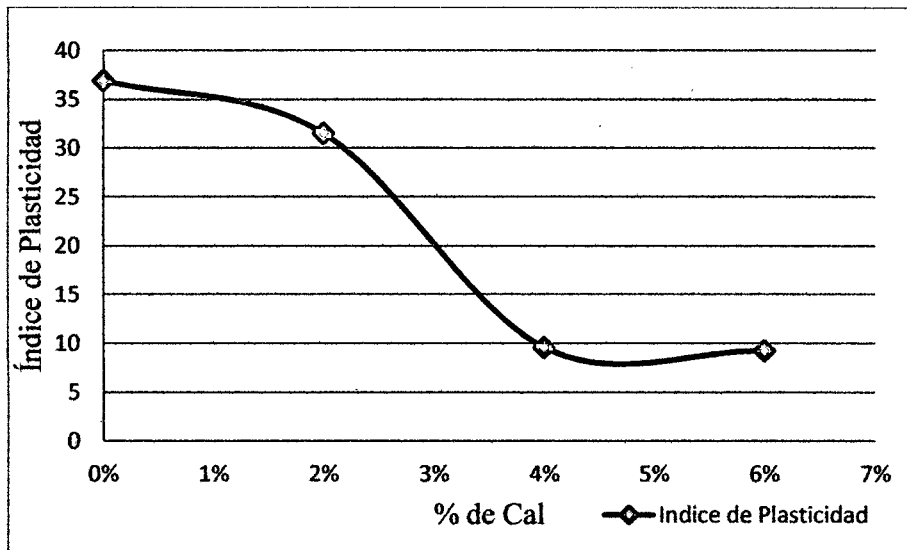


Fig. 13 Comportamiento del índice de plasticidad sobre los porcentajes de cal.

- El índice de plasticidad decae en un 74.97 % con respecto al índice de plasticidad del suelo sin agregar cal con respecto del suelo con adición de cal al 6%.
- Los límites líquidos varían en proporciones pequeñas, variando en un 16.10% entre la dosis de cal de 0% y cal al 6%.
- Los límites plásticos aumenta con la adición de cal hasta un 54%.

## Compactación Proctor y CBR

Tabla 17 Compactación Proctor y CBR

% de Cal	Dsmax (gr/cm <sup>3</sup> )	W%	CBR de diseño	% de variación de CBR
0%	1.69	16.80%	2.55%	
2%	1.65	20.81%	7.50%	294.118
4%	1.59	20.50%	11.48%	450.196
6%	1.55	22.20%	10.75%	421.569

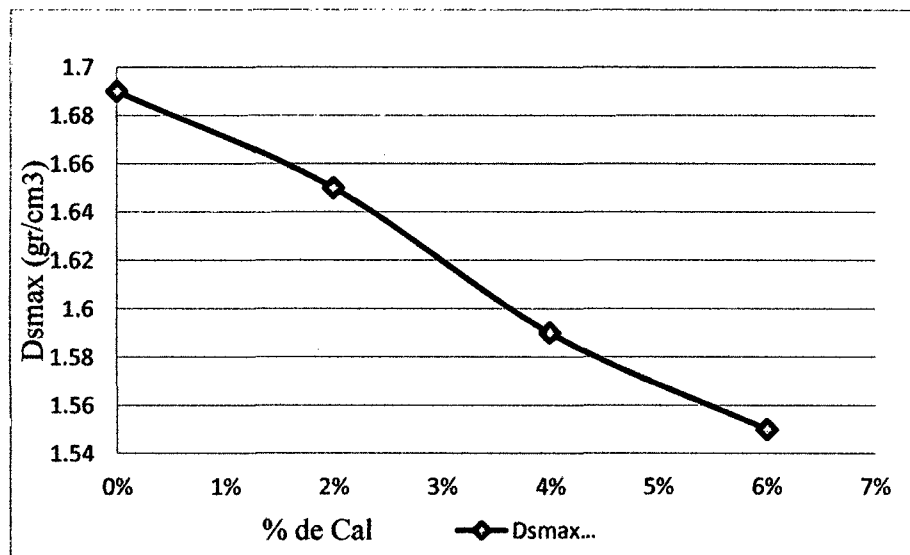


Fig. 14 Comportamiento de la Dsmax sobre los porcentajes de cal.

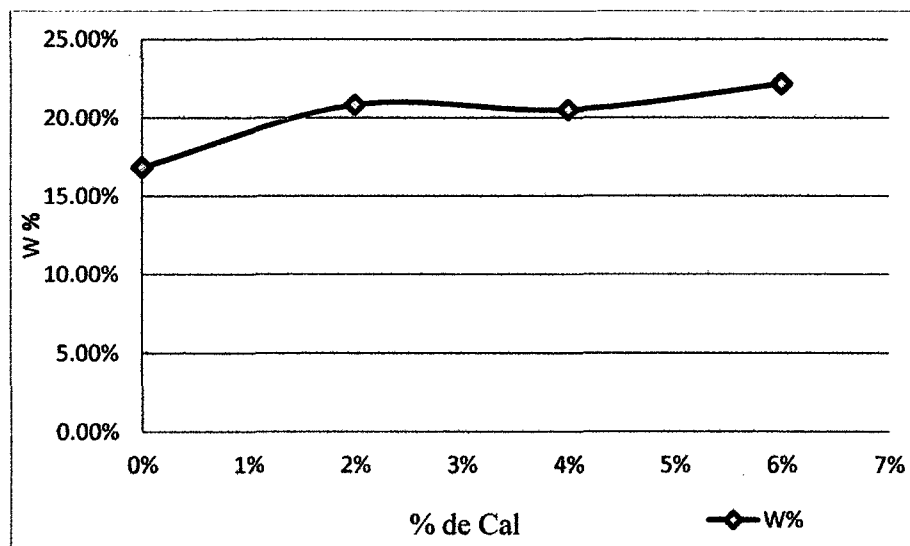


Fig. 15 Comportamiento del contenido de humedad (W%) sobre los porcentajes de cal.

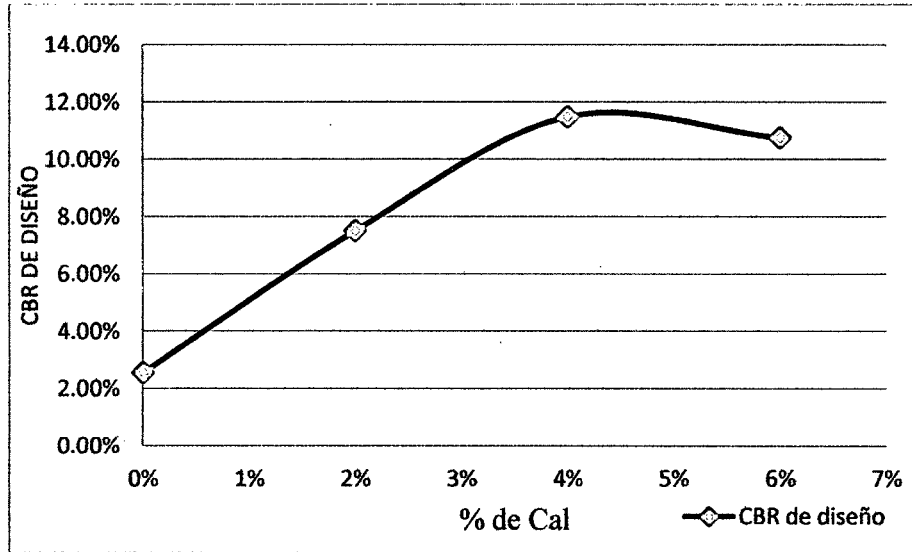


Fig. 16 Comportamiento del CBR sobre los porcentajes de cal.

- Las densidades disminuyen claramente con el aumento de las dosis de cal.
- A mayor dosis de cal mayor contenido de agua.
- El CBR de diseño al 95% aumenta hasta en un 450.2% de acuerdo como se muestra en la tabla 47.

### 4.3 Discusión de resultados.

- Según clasificación ASSHTO el suelo de la subrasante es A-7-5(29) y según clasificación SUCS es CH.
- Los resultados obtenidos con la adición de cal al 2%, 4%, y 6% muestra una clara variación en el índice plástico, índice líquido, contenido de humedad, densidad seca máxima y en el CBR al 95% y según los resultados presentados en el tercer congreso internacional realizado en Sao Pablo, Brasil, de infraestructura de transportes (CONINFRA 2009) Tabla 1, Presentan similares resultados.
- El CBR con cal al 4% mejoró en un 450.20% con respecto al CBR del suelo sin adicionar cal.
- El índice de plasticidad con cal al 6% se redujo en un 74.97%.
- Según los resultados obtenidos observamos un comportamiento similar entre los porcentajes de cal de 4% y 6% en el límite líquido, límite plástico y en el CBR.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Para este tipo de suelo perteneciente a la subrasante la dosis de cal al 4% es la óptima para estabilizarla.
- Con la adición de cal de 0%, 2%, 4% y 6% el comportamiento del límite líquido disminuye, teniendo su máxima disminución la muestra con cal al 4% con un 57.15 (ver Tabla 46). La muestra con cal al 0% tiene un límite líquido de 67.57.
- El límite plástico aumenta de acuerdo a la adición de cal logrando su máximo límite plástico de 47.60 con cal al 4%, el límite plástico menor es de 30.70 con cal al 0%.
- El índice de plasticidad disminuye, logrando la máxima disminución con la adición de 6% de cal, con un valor de 9.26. La muestra con cal al 0% presenta un índice plástico de 36.87, esto nos representa una disminución de un 74.97% del índice plástico.
- La densidad seca máxima con la adición de los diferentes porcentajes de cal disminuye, siendo el mínimo de 1.55 en la muestra con cal al 6%. El contenido de humedad aumenta siendo el máximo de 22.20% en la muestra con cal al 6%.
- El CBR de diseño al 95% máximo se logra con un porcentaje de cala de 4% con un valor de 11.48%. El CBR mínimo es de 2.55% sin adicionar cal a la muestra, el cual está por debajo de 6 exigido para subrasantes según norma (MTC EM 115). Este aumento del CBR de un 421.57% (ver tabla 47)



## **5.2 Recomendaciones**

- En una investigación futura a realizar se debería tomar en cuenta el PH de la muestra con las diferentes dosis de cal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bauzá Castelló, D. 2003. Estabilización de suelos con cal. Madrid, Es. Mezclas con cemento en las infraestructuras del transporte. 37 p.

Das Braja, M. 2001. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México D.F. Thomson Learning. 587 p.

Calcinor Química Natural. 2010. Mejora y estabilización de suelos con cal. Gipuzkoa, España. 16 p.

CONINFRA (Congreso de Infraestructura de transporte). (Tercer congreso de infraestructura de transportes) 2009. Estabilización de suelos con cemento portland y cal hidratada en pavimentos de la región amazónica del Perú. Sao Pablo, BR. ANDIT (Asociación Nacional de Infraestructura de Transporte). 27 p.

Elizondo Arrieta, f; Navas Carro, A; Sibaja Obando, D. 2010. Efecto de la cal en la estabilización de subrasantes. San Jose, Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. 16 p.

Fernández Loaiza, C. 1991. Mejoramiento y estabilización de suelos. Editorial Limusa. México.

Hernando Higuera, CH; Gómez Cristancho, JC; Pardo Naranjo, OE. 2012. Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC. 21 (32): 21-40.

IECA (Instituto Español del cemento y sus aplicaciones); ANCADE (Asociación Nacional de Fabricantes y Derivados de España); ANTER (Asociación Nacional Técnica de Estabilización de Suelos y Reciclado de Firmes). 2003 Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Madrid, Es. Instituto Español del cemento y sus aplicaciones. 205 p.

Juárez Badillo, E; Rico Rodríguez, A; 2005. Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo I. México, Limusa. 629p.

Manual de Estabilización de Suelo Tratado con Cal, 2004. Estabilización y Modificación con Cal. Publicación de la Nacional Lime Association. Bol. 326. P.42

Martínez Santos, J. 2012. Evaluación del mejoramiento de suelos arcillosos empleando materiales cementantes. Tesis Ing. Civil, México, Universidad Veracruzana. 122p.

MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones). 2013. Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos. Lima, Pe. 346 p.

Muelas Rodríguez, A. s.f. Manual de mecánica del suelo y cimentaciones: Mecánica de suelos y cimentaciones capítulo 1. 119p.

Olguin Coca, FJ. Mecánica de suelos I. 2011. Pachuca de Soto, México. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 21p.

Rico, A; Castillo H. 2005. La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas. México. Limusa. v.2, 645 p.

# ANEXOS

## 1. Tablas de cálculo de resultados

### Tabla 18 Contenido de humedad cal al 0%

#### Ensayo: contenido de humedad

Norma ASTM D 2216

Proyecto : Tesis: efecto de la cal en suelo arcilloso

Ubicación : Open plaza - Cajamrca

Fecha : 17 / 10 / 2014

Realizado por : Robinson Jara Anyaypoma

Calicata : C1

Estrato: E-1 Prof. 1.50 m.

#### Cal al 0%

	Estrato	E1
W t (gr.)		30.1
W mh + t (gr.)		285.1
W ms + t (gr.)		226.3
W mh (gr.)		255
W ms (gr.)		196.2
Ww (gr.)		58.8
W %		29.97

Tabla 19 Análisis granulométrico por lavado

**ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR LAVADO**

**NORMA ASTM D 421**

PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO

UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA

FECHA : 17 / 10 / 2014

REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : C1                    ESTRATO: E-1                    PROF. (m): 1.50

Wms : 263.7 gr.

**CAL AL 0%**

MALLA	MALLA (mm)	P.R.P	% R.P.	% R.A	% PASA
3/4"	19.050				
1/2"	12.700				
1/4"	6.350				
N° 4	4.760				
N° 10	2.000	24.00	9.10%	9.10%	90.90%
N° 20	0.840	1.80	0.68%	9.78%	90.22%
N° 30	0.590	1.40	0.53%	10.31%	89.69%
N° 40	0.420	2.00	0.76%	11.07%	88.93%
N° 60	0.250	7.30	2.77%	13.84%	86.16%
N° 100	0.150	12.60	4.78%	18.62%	81.38%
N° 200	0.074	19.80	7.51%	26.13%	73.87%
Pérdida por lavado		194.80	73.87%	100.00%	0.00%

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

LIMO Y ARCILLA	ARENA			GRAVA	
	FINA	MEDIA	GRUESA	FINA	GRUESA
	N° 200	N° 40	N° 10	N° 4	3/4"      3"

**Gráfico**

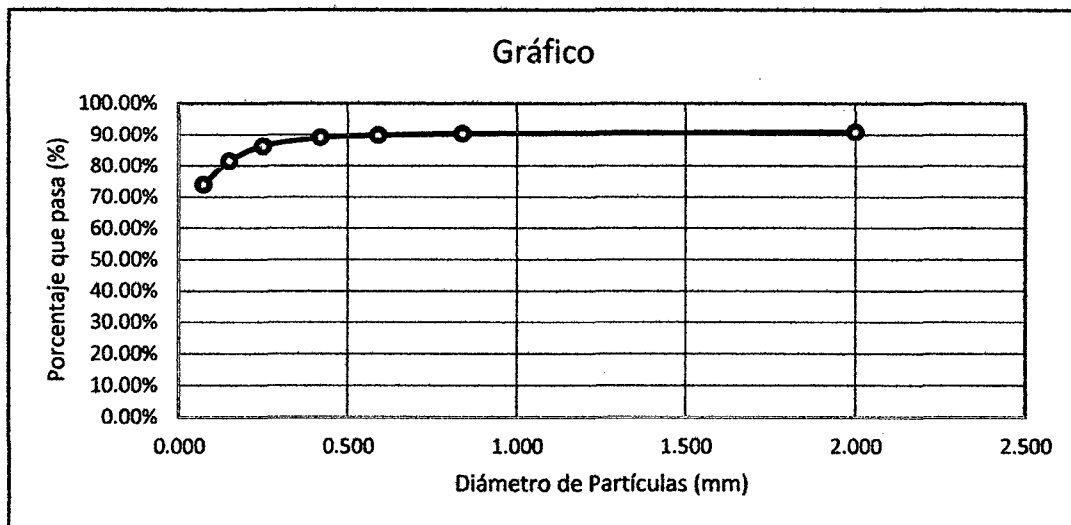


Tabla 20 Límite líquido para suelo con 0% de Cal

**ENSAYO: LÍMITE LÍQUIDO**

NORMA ASTM D 4318

PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO

UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA

FECHA : 17 / 10 / 2014

REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : CI                    ESTRATO: E-1                    PROF. (m): 1.50

**CAL AL 0%**

TARA	LL1	LL2	LL3
W t (gr.)	20.34	18.95	21.17
W mh + t (gr.)	33.38	33.47	35.4
W ms + t (gr.)	28.22	27.61	29.55
W w (gr.)	5.16	5.86	5.85
W ms (gr.)	7.88	8.66	8.38
Nº golpes	34	24	16
W %	65.48	67.67	69.81
LL	67.57		

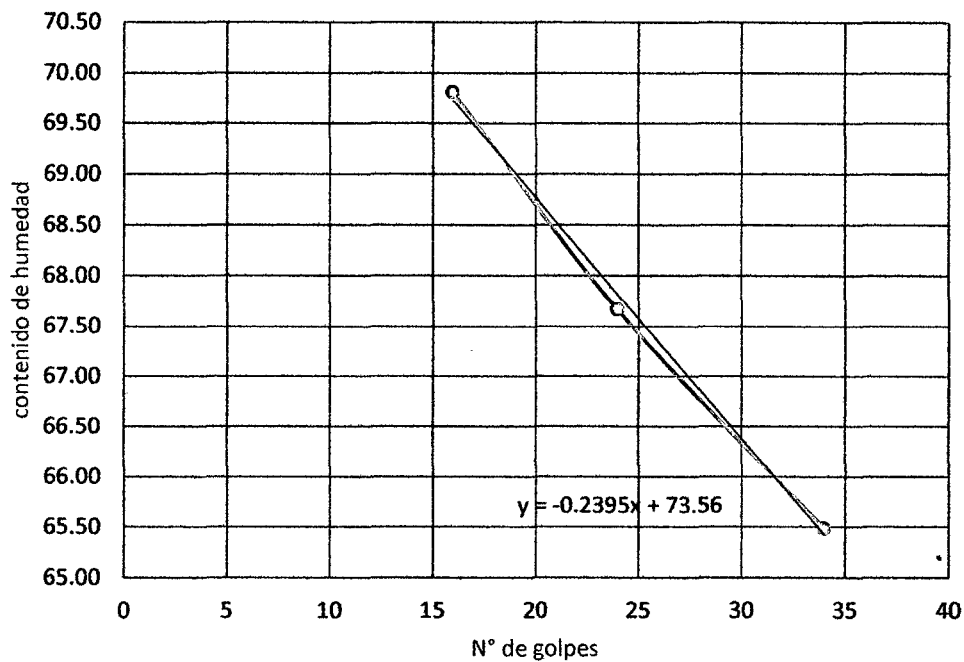


Tabla 21 Límite plástico ASTM D 4318 0% de cal

<b>Ensayo: límite plástico</b>			
Norma ASTM D 4318			
Proyecto	: Tesis: efecto de la cal en suelo arcilloso		
Ubicación	: Open plaza - cajamarca		
Fecha	: 17 / 10 / 2014		
Realizado por	: Robinson Jara Anyaypoma		
Calicata	: C1	Estrato:	E-1 Prof. (m): 1.50
<b>Cal al 0%</b>			
	<u>Tara</u>	<u>Lp 1</u>	<u>Lp 2</u>
W t (gr.)	22.15	22.40	
W mh + t (gr.)	30.18	28.70	
W ms + t (gr.)	28.32	27.20	
W w (gr.)	1.86	1.5	
W ms (gr.)	6.17	4.80	
W %	30.15	31.25	
Lp	<b>30.70</b>		

Tabla 22 Parámetros del suelo cal al 0%

Límite Líquido (%)	<b>67.57</b>
Límite Plástico (%)	<b>30.70</b>
Índice de Plasticidad Ip (%)	<b>36.87</b>
Clasificación SUCS	<b>CH</b>
Clasificación AASHTO	<b>A-7-5(29)</b>



Tabla 23 Proctor modificado 0% de cal.

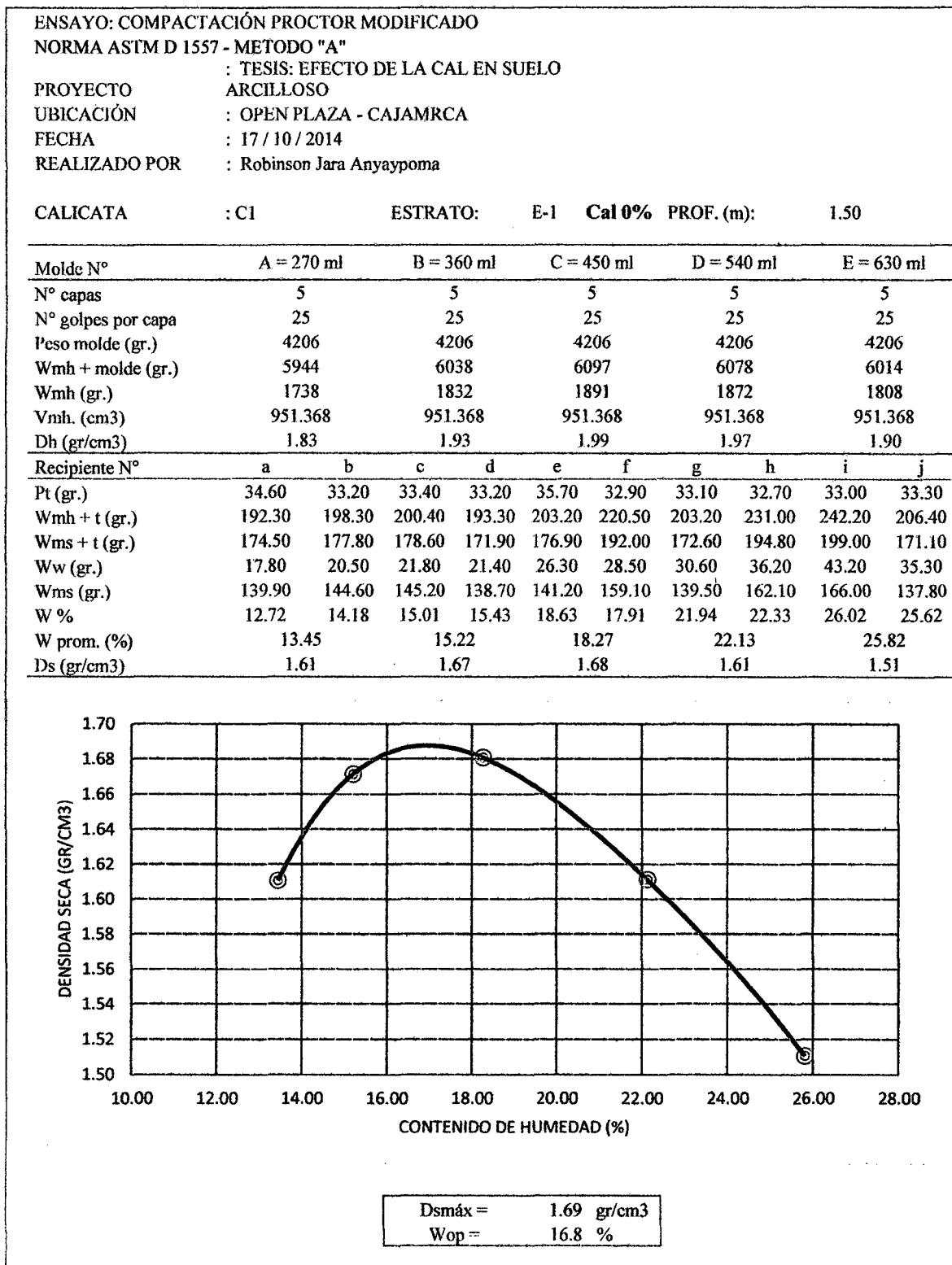


Tabla 24 Compactación CBR 0% de cal fase A

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA FECHA : 17/10/2014 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyapoma										
CALICATA : CI		ESTRATO: E-1		PROF. (m): 1.50		Cal al 0%				
Molde N°	1		2		3					
N° capas	5		5		5					
N° golpes por capa	12		25		56					
CONDICIÓN DE MUESTRA	Antes empapar	Despues	Antes empapar	Despues	Antes empapar	Despues				
Peso molde (gr.)	8577.5	8577.5	8571	8571	8650.5	8650.5				
Wmh + molde (gr.)	12371	12644	12609.5	12771	12831	12897				
Wmh (gr.)	3793.5	4066.5	4038.5	4200	4180.5	4246.5				
Vmh. (cm3)	2016.32	2016.32	2018.09	2018.09	2014.55	2014.55				
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.88	2.02	2.00	2.08	2.08	2.11				
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Ensayo N°	1 - A	1 - B	1 - C	2 - A	2 - B	2 - C	3 - A	3 - B	3 - C	
Wt (gr.)	32.7	32.7	34.6	32.2	32.2	33.3	35.7	35.7	33.1	
Wmh + t (gr.)	245	245	230	211.4	211.4	267.3	195.9	195.9	254.6	
Wms + t (gr.)	213.6	213.6	180.7	185.2	185.2	208.3	173.7	173.7	199.5	
Ww (gr.)	31.4	31.4	49.3	26.2	26.2	59	22.2	22.2	55.1	
Wms (gr.)	180.9	180.9	146.1	153	153	175	138	138	166.4	
w (%)	17.36	17.36	33.74	17.12	17.12	33.71	16.09	16.09	33.11	
w prom (%)	17.36		33.74		17.12		16.09		33.11	
densidad seca (gr/cm3)	1.60		1.51		1.71		1.56		1.79	
ENSAYO: HINCHAMIENTO										
TIEMPO ACUMULADO		MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO	
(HORAS)	(DIAS)	DEFORM.	(mm.)	(%)	DEFORM.	(mm.)	(%)	DEFORM.	(mm.)	(%)
06/11/2014	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
07/11/2014	1	128.000	128.000	11.532	107.000	107.000	9.640	90.000	90.000	8.108
08/11/2014	2	149.000	149.000	13.423	122.000	122.000	10.991	101.000	101.000	9.099
09/11/2014	3	158.000	158.000	14.234	139.000	139.000	12.523	125.000	125.000	11.261
10/11/2014	4	161.500	161.500	14.550	142.000	142.000	12.793	130.000	130.000	11.712

Tabla 25 CBR carga-penetración 0% de cal fase B

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO  
 NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429  
 PROYECTO : TESIS; EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO  
 UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA  
 FECHA : 17 / 10 / 2014  
 SOLICITANTE : UNC  
 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : C1      ESTRATO: E-1      PROF. (m) : 1.50      **Cal al 0%**

ENSAYO: CARGA - PENETRACIÓN

PENETRACIÓN (mm)	(pulg.)	Molde N° 1		Molde N° 2		Molde N° 3				
		CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm2) (Lb/pulg2)	CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm2) (Lb/pulg2)	CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm2) (Lb/pulg2)			
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
0.64	0.03	15.00	0.75	10.26	18.20	0.91	12.44	24.20	1.20	16.55
1.27	0.05	32.20	1.60	22.02	37.90	1.88	25.91	43.50	2.16	29.74
1.91	0.08	43.40	2.16	29.68	45.00	2.24	30.77	50.80	2.53	34.74
2.54	0.10	49.80	2.48	34.05	50.90	2.53	34.80	59.20	2.94	40.48
3.81	0.15	54.00	2.69	36.92	58.00	2.88	39.66	64.10	3.19	43.83
5.08	0.20	55.40	2.75	37.88	60.40	3.00	41.30	68.20	3.39	46.63
6.35	0.25	58.20	2.89	39.80	63.00	3.13	43.08	72.00	3.58	49.23
7.62	0.30	60.50	3.01	41.37	65.00	3.23	44.45	75.20	3.74	51.42
10.16	0.40	63.80	3.17	43.62	67.60	3.36	46.22	77.00	3.83	52.65
12.70	0.50	68.30	3.40	46.70	70.00	3.48	47.86	79.00	3.93	54.02

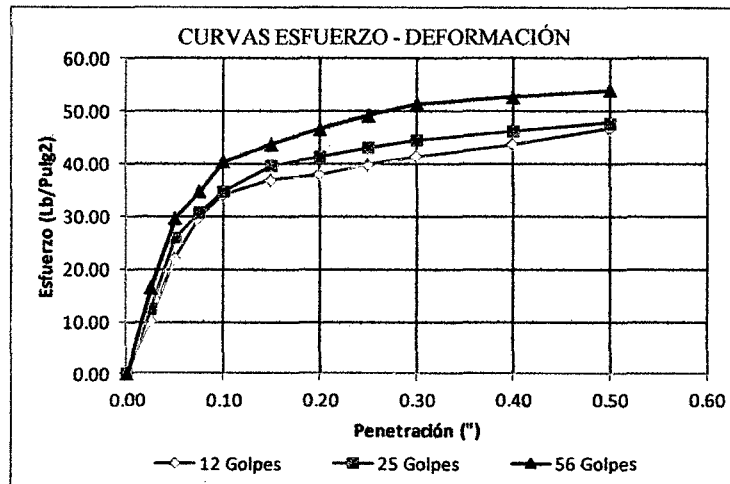


Tabla 26 CBR esfuerzos 0% de cal fase C

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO  
 NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429  
 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO  
 UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA  
 FECHA : 17 / 10 / 2014  
 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : C1 ESTRATO: E-1 PROF. (m) : 1.50 Cal al 0%

ESFUERZOS PARA 01" Y 02" DE PENETRACIÓN

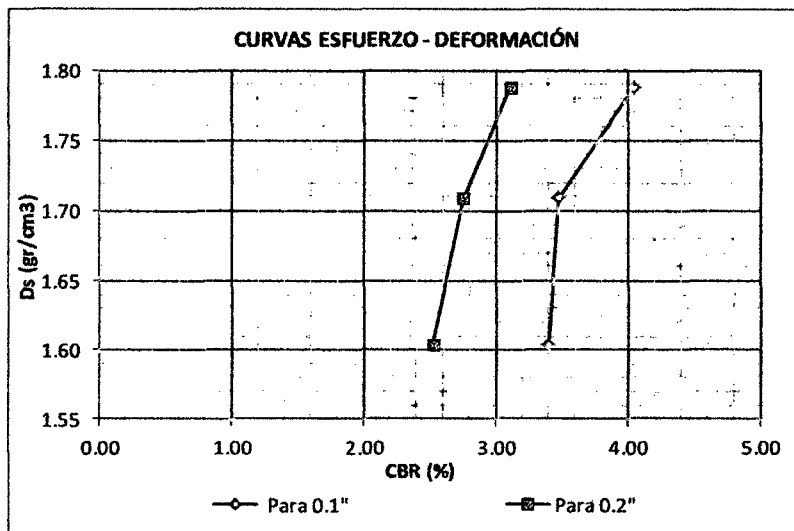
MOLDE N°	MOLDE N° 1		MOLDE N° 2		MOLDE N° 3	
Penetración	01"	02"	01"	02"	01"	02"
Esfuerzo Terreno (lb/pg <sup>2</sup> )	34.052	37.881	34.804	41.300	40.479	46.633
Esfuerzo patrón (lb/pg <sup>2</sup> )	1000	1500	1000	1500	1000	1500
CBR (%)	3.41	2.53	3.48	2.75	4.05	3.11

C.B.R. Y DENSIDAD SECA

MOLDE N°	MOLDE N° 1		MOLDE N° 2		MOLDE N° 3	
Penetración (")	01"	02"	01"	02"	01"	02"
CBR (%)	3.41	2.53	3.48	2.75	4.05	3.11
Ds (gr/cm <sup>3</sup> )	1.60	1.60	1.71	1.71	1.79	1.79

GRAFICO

PARA 0.1"		PARA 0.2"	
CBR	Ds	CBR	Ds
3.41	1.60	2.53	1.60
3.48	1.71	2.75	1.71
4.05	1.79	3.11	1.79



Ds Máx =	1.69	gr/cm <sup>2</sup>
95% Ds Máx =	1.61	gr/cm <sup>3</sup>

CBR (0.1")	3.41%
CBR (0.2")	2.55%

Cal al 0%

**CBR DE DISEÑO = 2.55%**

Tabla 27 Límite líquido para suelo con 2% de cal

**ENSAYO: LÍMITE LÍQUIDO**

NORMA ASTM D 4318

PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO

UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA

: 17 / 10 /

FECHA 2014

REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : CI                      ESTRATO: E-1                      PROF. (m): 1.50

**CAL AL 2%**

TARA	LL1	LL2	LL3
W t (gr.)	27.49	30.36	27.29
W mh + t (gr.)	44.21	45.01	43.02
W ms + t (gr.)	37.84	39.33	36.8
W w (gr.)	6.37	5.68	6.22
W ms (gr.)	10.35	8.97	9.51
Nº golpes	35	25	16
W %	61.55	63.32	65.40
LL	<b>63.49</b>		

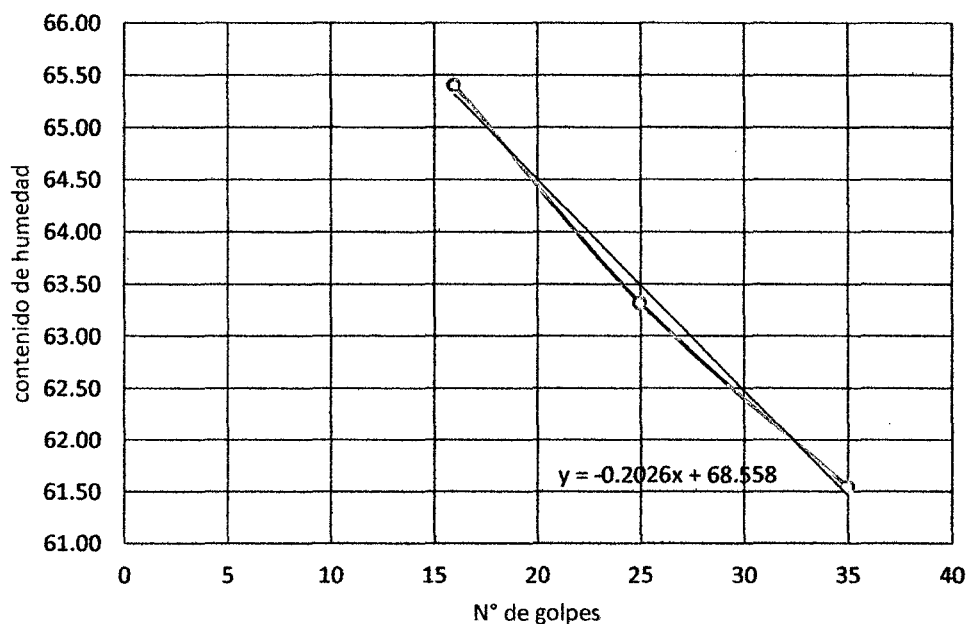


Tabla 28 Límite plástico ASTM D 4318 2% Cal

<b>ENSAYO: LÍMITE PLÁSTICO</b>			
NORMA ASTM D 4318			
PROYECTO	: TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO		
UBICACIÓN	: OPEN PLAZA - CAJAMRCA		
FECHA	: 17 / 10 / 2014		
REALIZADO POR	: Robinson Jara Anyaypoma		
CALICATA	: CI	ESTRATO: E-1	PROF. (m): 1.50
<b>CAL AL 2%</b>			
	TARA	LP 1	LP 2
W t (gr.)	26.71	24.15	
W mh + t (gr.)	33.18	32.47	
W ms + t (gr.)	31.61	30.45	
W w (gr.)	1.57	2.02	
W ms (gr.)	4.9	6.30	
W %	32.04	32.06	
LP	<b>32.05</b>		

Tabla 29 Parámetros del Suelo Cal al 2%

Límite Líquido (%)	<b>63.49</b>
Límite Plástico (%)	<b>32.05</b>
Índice de Plasticidad Ip (%)	<b>31.44</b>

Tabla 30 Proctor Modificado Cal al 2%

ENSAYO: COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO

NORMA ASTM D 1557 - METODO "A"

PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO

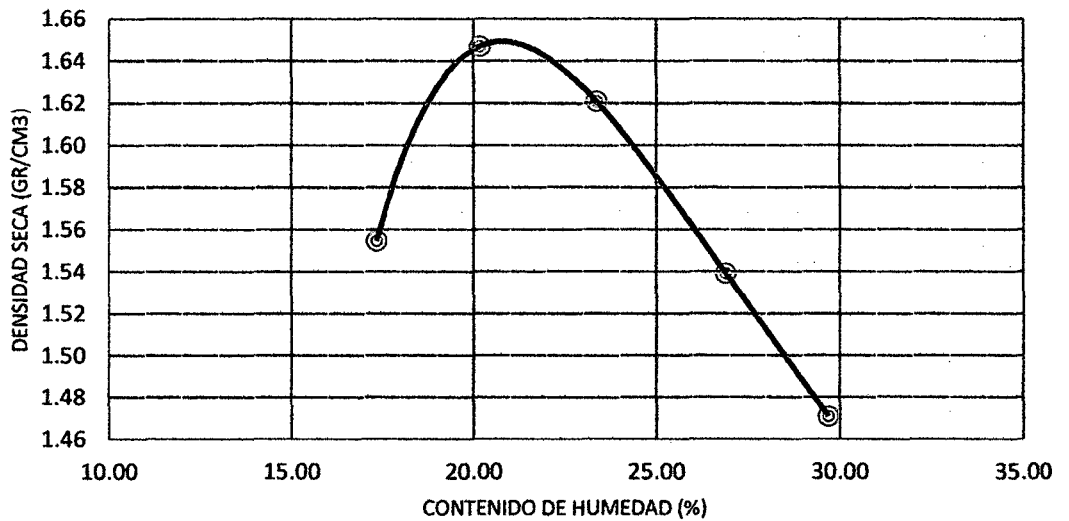
UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA

FECHA : 17 / 10 / 2014

REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : C1                      ESTRATO:                      E-1    Cal 2%                      PROF. (m):                      1.50

Molde N°	A = 270 ml		B = 360 ml		C = 450 ml		D = 540 ml		E = 630 ml	
N° capas	5		5		5		5		5	
N° golpes por capa	25		25		25		25		25	
Peso molde (gr.)	4271		4271		4271		4271		4271	
Wmh + molde (gr.)	5986		6132		6151		6107.5		6064.5	
Wmh (gr.)	1715		1861		1880		1836.5		1793.5	
Vmh. (cm3)	940.219		940.219		940.219		940.219		940.219	
Dh (gr/cm3)	1.82		1.98		2.00		1.95		1.91	
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Pt (gr.)	33.20	34.60	32.70	33.10	35.70	32.90	33.30	33.20	33.00	33.30
Wmh + t (gr.)	185.40	198.30	195.20	205.70	203.20	201.60	201.20	199.70	200.50	201.30
Wms + t (gr.)	163.00	174.00	167.90	176.70	171.40	169.70	165.70	164.30	162.00	163.00
Ww (gr.)	22.40	24.30	27.30	29.00	31.80	31.90	35.50	35.40	38.50	38.30
Wms (gr.)	129.80	139.40	135.20	143.60	135.70	136.80	132.40	131.10	129.00	129.70
W %	17.26	17.43	20.19	20.19	23.43	23.32	26.81	27.00	29.84	29.53
W prom. (%)	17.34		20.19		23.38		26.91		29.69	
Ds (gr/cm3)	1.55		1.65		1.62		1.54		1.47	



Dsmáx =	1.65 gr/cm3
Wop =	20.81 %

Tabla 31 Compactación CBR fase A cal al 2%

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA FECHA : 17 / 10 / 2014 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyappoma										
CALICATA : CI		ESTRATO: E-1		PROF. (m) : 1.50		<b>Cal al 2%</b>				
Molde N°	1		2		3					
N° capas	5		5		5					
N° golpes por capa	12		25		56					
CONDICIÓN DE MUESTRA	Antes empapar	Despues	Antes empapar	Despues	Antes empapar	Despues				
Peso molde (gr.)	8819	8819	8686	8686	8428.5	8428.5				
Wmh + molde (gr.)	12620	12855	12730.5	12743	12483	12501				
Wmh (gr.)	3801	4036	4044.5	4057	4054.5	4072.5				
Vmh. (cm3)	1999.54	1999.54	1989.52	1989.52	1987.78	1987.78				
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.90	2.02	2.03	2.04	2.04	2.05				
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Ensayo N°	1 - A	1 - B	1 - C	2 - A	2 - B	2 - C	3 - A	3 - B	3 - C	
Wt (gr.)	34.3	34.3	35.1	33.1	33.1	32.2	32.5	32.5	30.8	
Wmh + t (gr.)	230.6	230.6	205.1	259.2	259.2	237.4	274.3	274.3	222.6	
Wms + t (gr.)	195.6	195.6	164	217.4	217.4	187.4	233	233	175.5	
Ww (gr.)	35	35	41.1	41.8	41.8	50	41.3	41.3	47.1	
Wms (gr.)	161.3	161.3	128.9	184.3	184.3	155.2	200.5	200.5	144.7	
w (%)	21.70	21.70	31.89	22.68	22.68	32.22	20.60	20.60	32.55	
w prom (%)	21.70		31.89	22.68		32.22	20.60		32.55	
densidad seca (gr/cm3)	1.56		1.53	1.66		1.54	1.69		1.55	
ENSAYO: HINCHAMIENTO										
TIEMPO ACUMULADO		MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
(HORAS)	(DIAS)	LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO	LECTURA	HINCHAMIENTO		
		DEFORM.	(mm.)	(%)	DEFORM.	(mm.)	(%)	DEFORM.	(mm.)	(%)
0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	1	12.000	12.000	1.081	8.000	8.000	0.721	2.000	2.000	0.180
48	2	12.500	12.500	1.126	8.400	8.400	0.757	2.100	2.100	0.189
72	3	13.700	13.700	1.234	8.900	8.900	0.802	2.200	2.200	0.198
96	4	15.000	15.000	1.351	9.000	9.000	0.811	3.000	3.000	0.270



Tabla 32 CBR carga-penetración fase B cal al 2%

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO  
 NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429  
 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO  
 UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA  
 FECHA : 17/10/2014  
 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : C1 ESTRATO: E-1 PROF. (m) : 1.50 **Cal al 2%**

ENSAYO: CARGA - PENETRACIÓN

PENETRACIÓN (mm)	PENETRACIÓN (pulg.)	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )	ESFUERZO (Lb/pulg <sup>2</sup> )	CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )	ESFUERZO (Lb/pulg <sup>2</sup> )	CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )	ESFUERZO (Lb/pulg <sup>2</sup> )
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.64	0.03	25.50	1.27	17.44	31.90	1.59	21.81	33.00	1.64	22.56
1.27	0.05	75.20	3.74	51.42	96.40	4.79	65.92	98.90	4.92	67.62
1.91	0.08	125.60	6.25	85.88	151.70	7.54	103.73	158.30	7.87	108.24
2.54	0.10	143.90	7.16	98.39	169.00	8.40	115.56	177.30	8.82	121.23
3.81	0.15	156.70	7.79	107.15	173.00	8.60	118.29	184.10	9.16	125.88
5.08	0.20	159.20	7.92	108.86	173.00	8.60	118.29	184.60	9.18	126.22
6.35	0.25	163.10	8.11	111.52	173.00	8.60	118.29	185.10	9.20	126.57
7.62	0.30	163.10	8.11	111.52	173.00	8.60	118.29	186.00	9.25	127.18
10.16	0.40	163.10	8.11	111.52	173.00	8.60	118.29	186.00	9.25	127.18
12.70	0.50	163.10	8.11	111.52	173.00	8.60	118.29	186.00	9.25	127.18

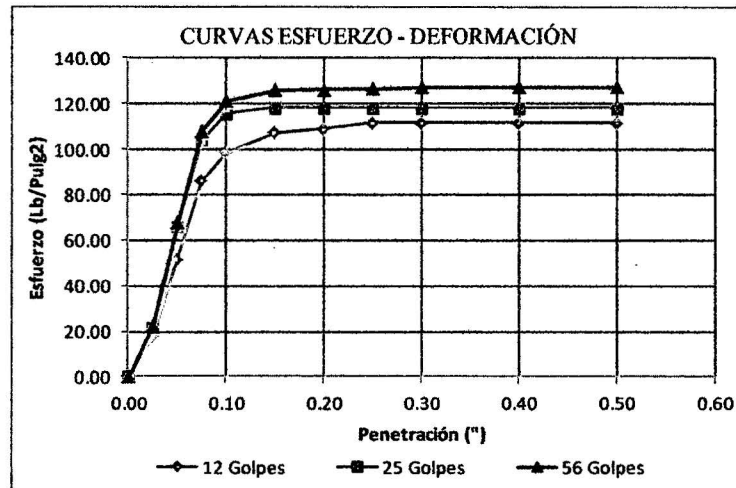


Tabla 33 CBR esfuerzos fase C cal al 2%

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO  
 NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429  
 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO  
 UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA  
 FECHA : 17/10/2014  
 SOLICITANTE : UNC  
 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyapoma

CALICATA : CI ESTRATO: E-1 PROF. (m): 1.50 **Cal al 2%**

ESFUERZOS PARA 01" Y 02" DE PENETRACIÓN

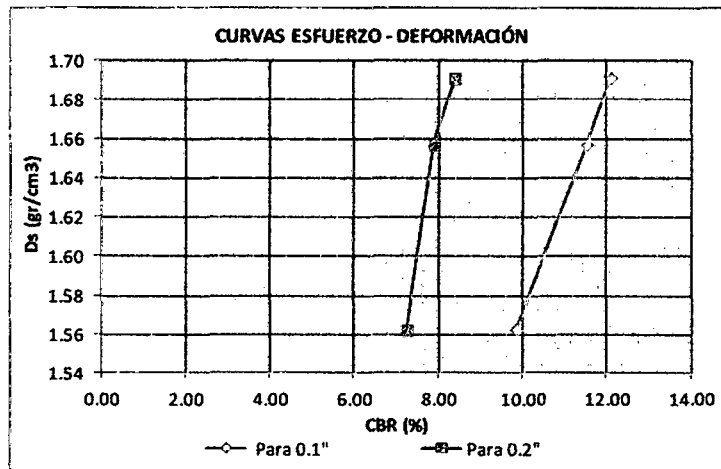
MOLDE Nº	MOLDE Nº 1		MOLDE Nº 2		MOLDE Nº 3	
	01"	02"	01"	02"	01"	02"
Penetración						
Esfuerzo Terreno (lb/pg <sup>2</sup> )	98.395	108.856	115.557	118.292	121.233	126.224
Esfuerzo patrón (lb/pg <sup>2</sup> )	1000	1500	1000	1500	1000	1500
CBR (%)	9.84	7.26	11.56	7.89	12.12	8.41

C.B.R. Y DENSIDAD SECA

MOLDE Nº	MOLDE Nº 1		MOLDE Nº 2		MOLDE Nº 3	
	01"	02"	01"	02"	01"	02"
Penetración (")						
CBR (%)	9.84	7.26	11.56	7.89	12.12	8.41
Ds (gr/cm <sup>3</sup> )	1.56	1.56	1.66	1.66	1.69	1.69

GRAFICO

PARA 0.1"		PARA 0.2"	
CBR	Ds	CBR	Ds
9.84	1.56	7.26	1.56
11.56	1.66	7.89	1.66
12.12	1.69	8.41	1.69



Ds Máx=	1.65	gr/cm <sup>2</sup>
95% Ds Máx=	1.57	gr/cm <sup>3</sup>

CBR (0.1")	10.40%
CBR (0.2")	7.50%

Cal al 2%

CBR DE DISEÑO = 7.50%

Tabla 34 Límite líquido para suelo cal al 4%

**ENSAYO: LÍMITE LÍQUIDO**

NORMA ASTM D 4318

PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO

UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA

FECHA : 17/10/2014

REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : C1                      ESTRATO: E-1                      PROF. (m): 1.50

**CAL AL 4%**

TARA	LL1	LL2	LL3
W t (gr.)	24.79	26.26	27.2
W mh + t (gr.)	40.14	42.49	41.49
W ms + t (gr.)	34.61	36.58	36.22
W w (gr.)	5.53	5.91	5.27
W ms (gr.)	9.82	10.32	9.02
Nº golpes	35	22	12
W %	56.31	57.27	58.43
LL	57.15		

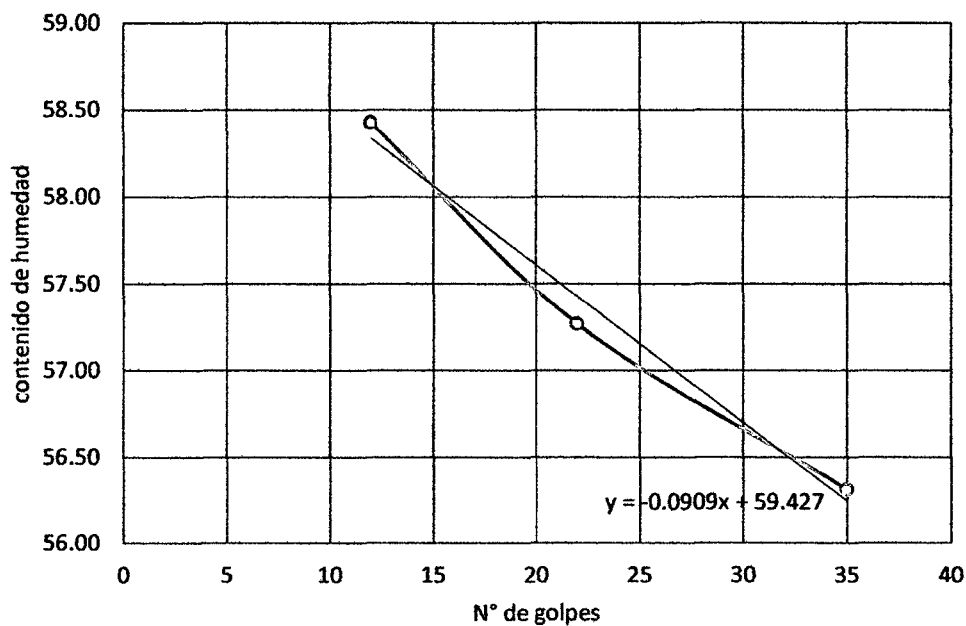


Tabla 35 Límite plástico ASTM D 4318 cal al 4%

<b>ENSAYO: LÍMITE PLÁSTICO</b>				
NORMA ASTM D 4318				
PROYECTO	: TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO			
UBICACIÓN	: OPEN PLAZA - CAJAMRCA			
FECHA	: 17 / 10 / 2014			
SOLICITANTE	: UNC			
REALIZADO POR	: Robinson Jara Anyaypoma			
CALICATA	: CI	ESTRATO:	E-1	PROF. (m): 1.50
CAL AL 4%				
	TARA	LP 1	LP 2	
W t (gr.)		25.53	24.25	
W mh + t (gr.)		33.58	33.58	
W ms + t (gr.)		30.8	30.80	
W w (gr.)		2.78	2.78	
W ms (gr.)		5.27	6.55	
W %		52.75	42.44	
LP		<b>47.60</b>		

Tabla 36 Parametros del Suelo Cal al 4%

Límite Líquido (%)	57.15
Límite Plástico (%)	47.60
Índice de Plasticidad Ip (%)	9.56

Tabla 37 Proctor Modificado Cal al 4%

ENSAYO: COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO										
NORMA ASTM D 1557 - METODO "A"										
PROYECTO	: TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO									
UBICACIÓN	: OPEN PLAZA - CAJAMRCA									
FECHA	: 17 / 10 / 2014									
REALIZADO POR	: Robinson Jara Anyaypoma									
CALICATA	: C1	ESTRATO:				E-1 Cal 4%	PROF. (m):		1.50	
Molde N°	A = 360 ml		B = 450 ml		C = 540 ml		D = 630 ml		E = 720 ml	
N° capas	5		5		5		5		5	
N° golpes por capa	25		25		25		25		25	
Peso molde (gr.)	4206		4206		4206		4206		4206	
Wmh + molde (gr.)	6007.5		6047		6046		6000		5943	
Wmh (gr.)	1801.5		1841		1840		1794		1737	
Vmh. (cm3)	951.368		951.368		951.368		951.368		951.368	
Dh (gr/cm3)	1.89		1.94		1.93		1.89		1.83	
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Pt (gr.)	35.30	35.10	32.10	33.40	33.10	31.60	32.00	32.70	32.20	34.30
Wmh + t (gr.)	204.30	186.70	193.80	183.30	202.30	174.70	232.60	184.50	199.30	203.00
Wms + t (gr.)	176.90	162.10	164.40	155.10	167.20	145.50	187.40	150.50	158.70	162.50
Ww (gr.)	27.40	24.60	29.40	28.20	35.10	29.20	45.20	34.00	40.60	40.50
Wms (gr.)	141.60	127.00	132.30	121.70	134.10	113.90	155.40	117.80	126.50	128.20
W %	19.35	19.37	22.22	23.17	26.17	25.64	29.09	28.86	32.09	31.59
W prom. (%)	19.36		22.70		25.91		28.97		31.84	
Ds (gr/cm3)	1.59		1.58		1.54		1.46		1.38	

Dsmáx =	1.59 gr/cm3
Wop =	20.5 %

Tabla 38 Compactación CBR Fase A Cal al 4%

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA FECHA : 17 / 10 / 2014 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyapoma										
CALICATA : CI		ESTRATO: E-1		PROF. (m) : 1.50		<b>Cal al 4%</b>				
Molde N°	1		2		3					
N° capas	5		5		5					
N° golpes por capa	12		25		56					
CONDICIÓN DE MUESTRA	Antes cmpapar	Despues	Antes cmpapar	Despues	Antes cmpapar	Despues				
Peso molde (gr.)	8577.5	8577.5	8571	8571	8650.5	8650.5				
Wmh + molde (gr.)	12410.5	12444	12560.5	12671	12691	12797				
Wmh (gr.)	3833	3866.5	3989.5	4100	4040.5	4146.5				
Vmh. (cm <sup>3</sup> )	2016.32	2016.32	2018.09	2018.09	2014.55	2014.55				
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.90	1.92	1.98	2.03	2.01	2.06				
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Ensayo N°	1 - A	1 - B	1 - C	2 - A	2 - B	2 - C	3 - A	3 - B	3 - C	
Wt (gr.)	34.3	34.3	34.6	32.4	32.4	30.8	33.1	33.1	33.3	
Wmh + t (gr.)	255.6	255.6	254.8	251.1	251.1	286.8	242.3	242.3	260.4	
Wms + t (gr.)	207.4	207.4	202.8	209.9	209.9	227.8	203.8	203.8	207.5	
Ww (gr.)	48.2	48.2	52	41.2	41.2	59	38.5	38.5	52.9	
Wms (gr.)	173.1	173.1	168.2	177.5	177.5	197	170.7	170.7	174.2	
w (%)	27.85	27.85	30.92	23.21	23.21	29.95	22.55	22.55	30.37	
w prom (%)	27.85		30.92	23.21		29.95	22.55		30.37	
densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.49		1.46	1.60		1.56	1.64		1.58	
ENSAYO: HINCHAMIENTO										
TIEMPO ACUMULADO		MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
(HORAS)	(DIAS)	LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO (mm.)	(%)	LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO (mm.)	(%)	LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO (mm.)	(%)
0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	1	5.000	5.000	0.450	4.000	4.000	0.360	0.000	0.000	0.000
48	2	5.500	5.500	0.495	4.000	4.000	0.360	0.000	0.000	0.000
72	3	6.500	6.500	0.586	4.000	4.000	0.360	0.500	0.500	0.045
96	4	7.100	7.100	0.640	4.000	4.000	0.360	1.000	1.000	0.090

Tabla 39 CBR carga-penetración fase B cal al 4%

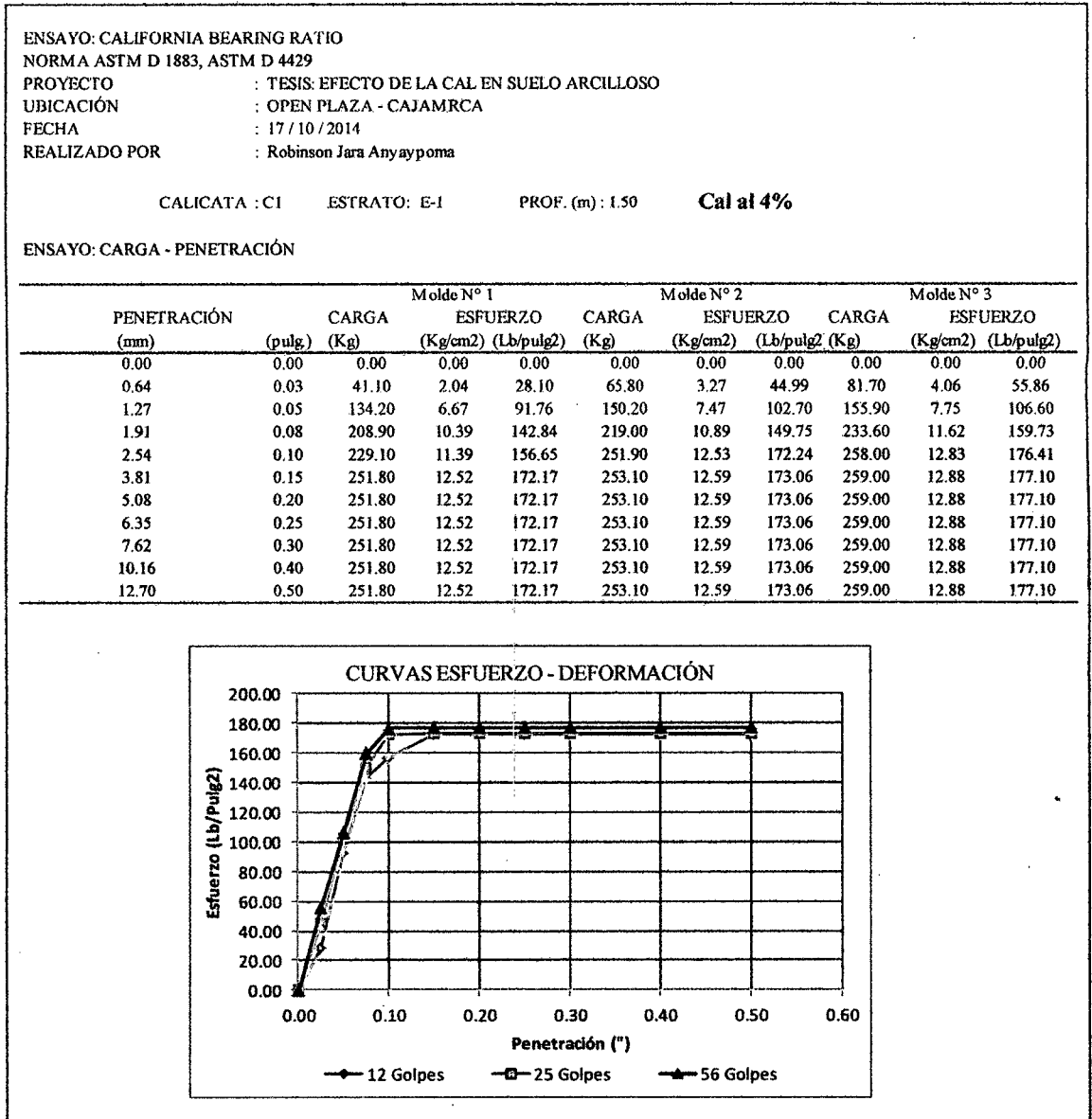


Tabla 40 CBR esfuerzos fase C cal al 4%

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO  
 NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429  
 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO  
 UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA  
 FECHA : 17 / 10 / 2014  
 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : CI ESTRATO: E-I PROF. (m) : 1.50 **Cal al 4%**

ESFUERZOS PARA 01" Y 02" DE PENETRACIÓN

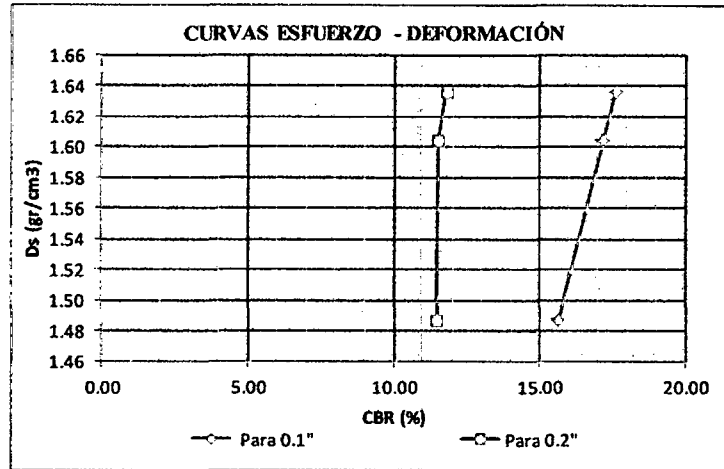
MOLDENº	MOLDENº 1		MOLDENº 2		MOLDENº 3	
	01"	02"	01"	02"	01"	02"
Penetración	01"	02"	01"	02"	01"	02"
Esfuerzo Terreno (lb/pg2)	156.652	172.174	172.242	173.062	176.413	177.097
Esfuerzo patrón (lb/pg2)	1000	1500	1000	1500	1000	1500
CBR (%)	15.67	11.48	17.22	11.54	17.64	11.81

C.B.R. Y DENSIDAD SECA

MOLDENº	MOLDENº 1		MOLDENº 2		MOLDENº 3	
	01"	02"	01"	02"	01"	02"
Penetración (")	01"	02"	01"	02"	01"	02"
CBR (%)	15.67	11.48	17.22	11.54	17.64	11.81
Ds (gr/cm3)	1.49	1.49	1.60	1.60	1.64	1.64

GRAFICO

PARA 0.1"		PARA 0.2"	
CBR	Ds	CBR	Ds
15.67	1.49	11.48	1.49
17.22	1.60	11.54	1.60
17.64	1.64	11.81	1.64



Ds Máx =	1.59	gr/cm2
95% Ds Máx =	1.51	gr/cm3

CBR (0.1")	16.30%
CBR (0.2")	11.48%

Cal al 4%

CBR DE DISEÑO = 11.48%



Tabla 41 Límite líquido para Suelo con 6% Cal

**ENSAYO: LÍMITE LÍQUIDO**

NORMA ASTM D 4318

PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO

UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA

: 17 / 10 /

FECHA 2014

REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : C1                      ESTRATO: E-1                      PROF. (m): 1.50

**CAL AL 6%**

TARA	LL1	LL2	LL3
W t (gr.)	26.83	25.98	26.04
W mh + t (gr.)	42.05	40.02	39.36
W ms + t (gr.)	36.65	34.95	34.44
W w (gr.)	5.4	5.07	4.92
W ms (gr.)	9.82	8.97	8.4
N° golpes	33	25	17
W %	54.99	56.52	58.57
LL	56.69		

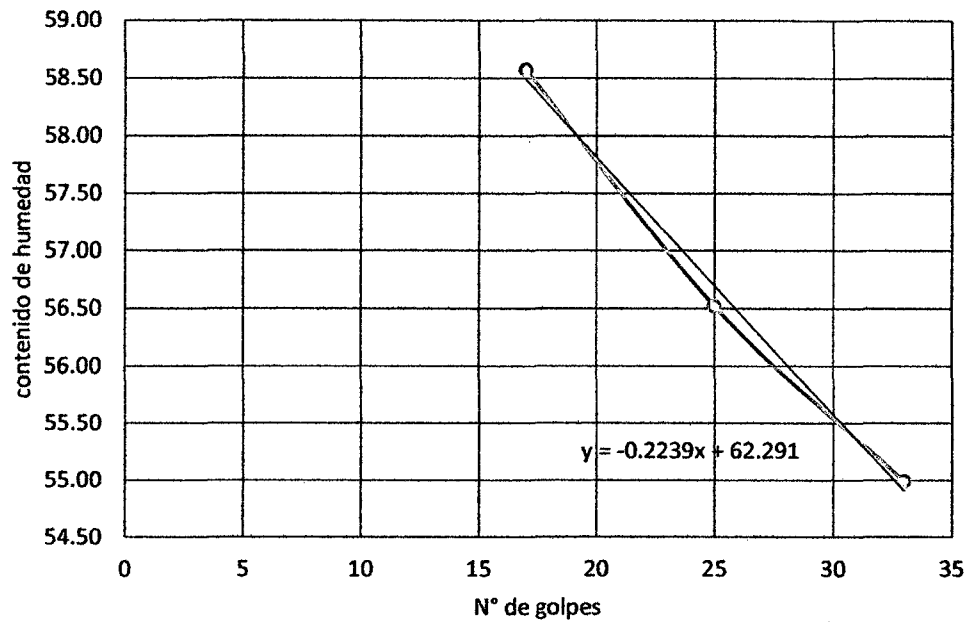


Tabla 42 Límite plástico ASTM D 4318 6% cal

<b>ENSAYO: LÍMITE PLÁSTICO</b>				
NORMA ASTM D 4318				
PROYECTO	: TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO			
UBICACIÓN	: OPEN PLAZA - CAJAMRCA			
FECHA	: 17 / 10 / 2014			
REALIZADO POR	: Robinson Jara Anyaypoma			
CALICATA	: C1	ESTRATO:	E-1	PROF. (m): 1.50
CAL AL 6%				
	TARA	LP 1	LP 2	
W t (gr.)	26.43	22.46		
W mh + t (gr.)	31.68	33.15		
W ms + t (gr.)	29.99	29.71		
W w (gr.)	1.69	3.44		
W ms (gr.)	3.56	7.25		
W %	47.47	47.45		
LP	47.46			

Tabla 43 Parámetros del Suelo cal al 6%

Límite Líquido (%)	56.69
Límite Plástico (%)	47.46
Índice de Plasticidad Ip (%)	9.23

Tabla 44 Proctor modificado cal al 6%

ENSAYO: COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO

NORMA ASTM D 1557 - METODO "A"

: TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO

PROYECTO ARCILLOSO

UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA

FECHA : 17 / 10 / 2014

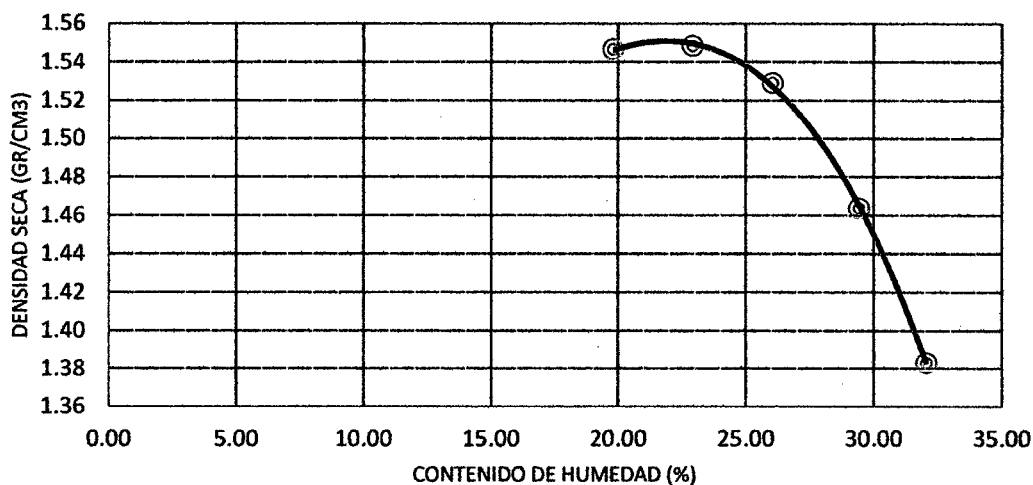
REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : CI                      ESTRATO:                      E-1 Cal 6%                      PROF. (m):                      1.50

Molde N°	A = 360 ml	B = 450 ml	C = 540 ml	D = 630 ml	E = 720 ml
N° capas	5	5	5	5	5
N° golpes por capa	25	25	25	25	25
Peso molde (gr.)	4206	4206	4206	4206	4206
Wmh + moldc (gr.)	5969	6017	6040	6008.5	5943.5
Wmh (gr.)	1763	1811	1834	1802.5	1737.5
Vmh. (cm3)	951.368	951.368	951.368	951.368	951.368
Dh (gr/cm3)	1.85	1.90	1.93	1.89	1.83

Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Pt (gr.)	33.10	33.30	32.90	33.10	32.60	34.50	33.20	33.30	35.30	32.20
Wmh + t (gr.)	202.30	196.50	197.80	221.50	204.80	234.60	209.20	241.90	254.70	197.20
Wms + t (gr.)	174.40	169.40	166.80	186.60	169.20	193.20	169.20	194.40	202.00	156.70
Ww (gr.)	27.90	27.10	31.00	34.90	35.60	41.40	40.00	47.50	52.70	40.50
Wms (gr.)	141.30	136.10	133.90	153.50	136.60	158.70	136.00	161.10	166.70	124.50
W %	19.75	19.91	23.15	22.74	26.06	26.09	29.41	29.48	31.61	32.53
W prom. (%)	19.83		22.94		26.07		29.45		32.07	
Ds (gr/cm3)	1.55		1.55		1.53		1.46		1.38	



Dsmáx =	1.55 gr/cm3
Wop =	22.2 %

Tabla 45 Compactación CBR Fase A cal al 6%

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO										
NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429										
PROYECTO	: TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO									
UBICACIÓN	: OPEN PLAZA - CAJAMRCA									
FECHA	: 17 / 10 / 2014									
REALIZADO POR	: Robinson Jara Anyappoma									
CALICATA : CI		ESTRATO: E-1		PROF. (m) : 1.50		Cal al 6%				
Molde N°	1			2			3			
N° capas	5			5			5			
N° golpes por capa	12			25			56			
CONDICIÓN DE MUESTRA	Antes empapar	Despues	Antes empapar	Despues	Antes empapar	Despues	Antes empapar	Despues		
Peso molde (gr.)	8819	8819	8686	8686	8428.5	8428.5	8428.5	8428.5		
Wmh + molde (gr.)	12361	12549.5	12464.5	12685.5	12339.5	12461	12339.5	12461		
Wmh (gr.)	3542	3730.5	3778.5	3999.5	3911	4032.5	3911	4032.5		
Vmh. (cm3)	1999.54	1999.54	1989.52	1989.52	1987.78	1987.78	1987.78	1987.78		
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.77	1.87	1.90	2.01	1.97	2.03	1.97	2.03		
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Ensayo N°	1 - A	1 - B	1 - C	2 - A	2 - B	2 - C	3 - A	3 - B	3 - C	
Wt (gr.)	35.6	35.6	32.2	32.6	32.6	33.1	32.1	32.1	35.1	
Wmh + t (gr.)	250.6	250.6	331.8	251.5	251.5	314.4	250.7	250.7	231.1	
Wms + t (gr.)	211.4	211.4	260.1	211.6	211.6	247	210.8	210.8	184.2	
Ww (gr.)	39.2	39.2	71.7	39.9	39.9	67.4	39.9	39.9	46.9	
Wms (gr.)	175.8	175.8	227.9	179	179	213.9	178.7	178.7	149.1	
w (%)	22.30	22.30	31.46	22.29	22.29	31.51	22.33	22.33	31.46	
w prom (%)	22.30	31.46	22.29	31.51	22.33	31.46	22.33	31.46	31.46	
densidad seca (gr/cm3)	1.45	1.42	1.55	1.53	1.61	1.54	1.53	1.61	1.54	
ENSAYO: HINCHAMIENTO										
TIEMPO ACUMULADO (HORAS)		MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
		LECTURA (DIAS)	LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO (mm.)	LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO (mm.)	LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO (mm.)	LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO (mm.)
0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
24	1	128.000	128.000	11.532	107.000	107.000	9.640	90.000	90.000	
48	2	149.000	149.000	13.423	122.000	122.000	10.991	101.000	101.000	
72	3	158.000	158.000	14.234	139.000	139.000	12.523	125.000	125.000	
96	4	161.500	161.500	14.550	142.000	142.000	12.793	130.000	130.000	

Tabla 46 CBR carga-penetración fase B cal al 6%

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO  
 NORMA ASTM D 1883, ASTM D 4429  
 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO  
 UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA  
 FECHA : 17 / 10 / 2014  
 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyappoma

CALICATA : CI      ESTRATO: E-1      PROF. (m) : 1.50      **Cal al 6%**

ENSAYO: CARGA - PENETRACIÓN

PENETRACIÓN (mm)	(pulg.)	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> ) (Lb/pulg <sup>2</sup> )		CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> ) (Lb/pulg <sup>2</sup> )		CARGA (Kg)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> ) (Lb/pulg <sup>2</sup> )	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.64	0.03	21.30	1.06	14.56	39.40	1.96	26.94	56.80	2.82	38.84
1.27	0.05	68.20	3.39	46.63	120.30	5.98	82.26	159.20	7.92	108.86
1.91	0.08	119.40	5.94	81.64	169.30	8.42	115.76	222.70	11.07	152.28
2.54	0.10	156.20	7.77	106.81	206.80	10.28	141.40	244.30	12.15	167.05
3.81	0.15	196.20	9.76	134.16	232.40	11.56	158.91	258.40	12.85	176.69
5.08	0.20	225.20	11.20	153.99	249.40	12.40	170.53	258.40	12.85	176.69
6.35	0.25	234.90	11.68	160.62	249.50	12.41	170.60	258.40	12.85	176.69
7.62	0.30	239.10	11.89	163.49	249.50	12.41	170.60	258.40	12.85	176.69
10.16	0.40	239.10	11.89	163.49	249.50	12.41	170.60	258.40	12.85	176.69
12.70	0.50	239.10	11.89	163.49	249.50	12.41	170.60	258.40	12.85	176.69

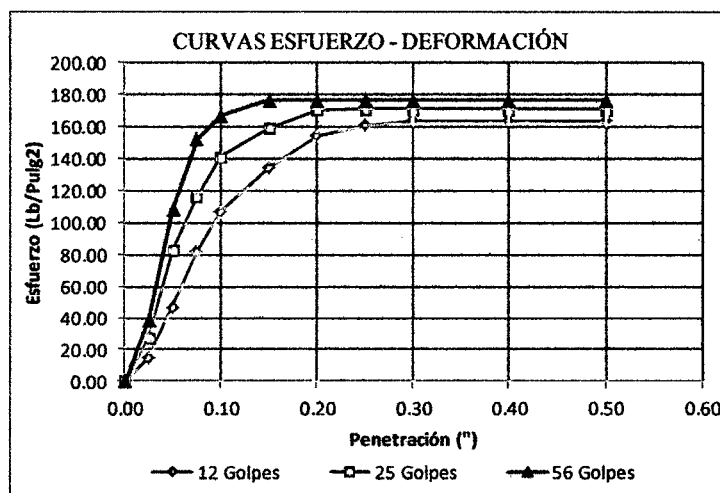


Tabla 47 CBR esfuerzos fase C cal al 6%

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO  
 NORMA ASTM D.1883, ASTM D 4429  
 PROYECTO : TESIS: EFECTO DE LA CAL EN SUELO ARCILLOSO  
 UBICACIÓN : OPEN PLAZA - CAJAMRCA  
 FECHA : 17 / 10 / 2014  
 REALIZADO POR : Robinson Jara Anyaypoma

CALICATA : C1 ESTRATO: E-1 PROF. (m) : 1.50 **Cal al 6%**

ESFUERZOS PARA 01" Y 02" DE PENETRACIÓN

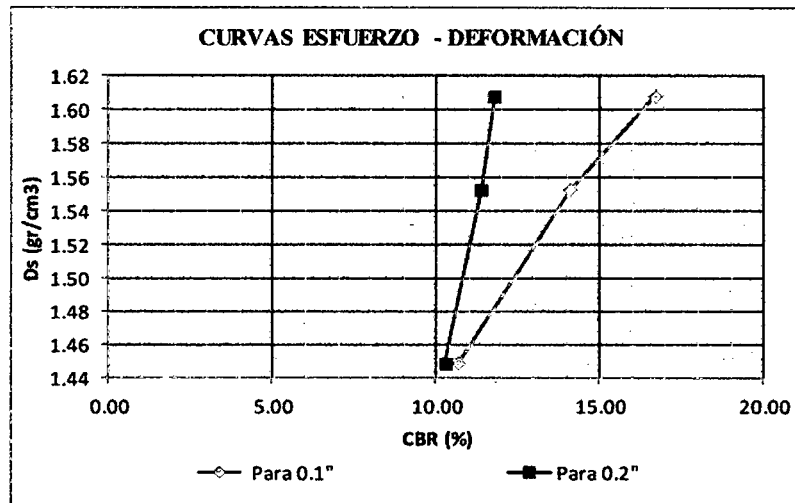
MOLDE N°	MOLDE N° 1		MOLDE N° 2		MOLDE N° 3	
Penetración	01"	02"	01"	02"	01"	02"
Esfuerzo Terreno (lb/pg <sup>2</sup> )	106.805	153.985	141.404	170.533	167.045	176.686
Esfuerzo patrón (lb/pg <sup>2</sup> )	1000	1500	1000	1500	1000	1500
CBR (%)	10.68	10.27	14.14	11.37	16.70	11.78

C.B.R. Y DENSIDAD SECA

MOLDE N°	MOLDE N° 1		MOLDE N° 2		MOLDE N° 3	
Penetración (")	01"	02"	01"	02"	01"	02"
CBR (%)	10.68	10.27	14.14	11.37	16.70	11.78
Ds (gr/cm <sup>3</sup> )	1.45	1.45	1.55	1.55	1.61	1.61

GRAFICO

PARA 0.1"		PARA 0.2"	
CBR	Ds	CBR	Ds
10.68	1.45	10.27	1.45
14.14	1.55	11.37	1.55
16.70	1.61	11.78	1.61



Ds Máx=	1.55	gr/cm <sup>2</sup>
95% Ds Máx=	1.47	gr/cm <sup>3</sup>

CBR (0.1")	12.20%
CBR (0.2")	10.75%

**Cal al 6%**

**CBR DE DISEÑO = 10.75%**

## 2. Galería de figuras

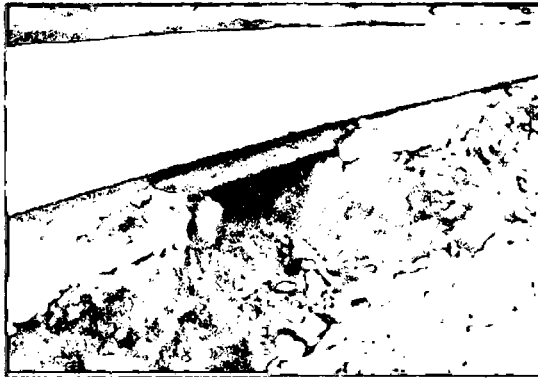


Fig. 17 La capa estabilizada con cal soporta la erosión, ilustrando la resistencia.  
(Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004)

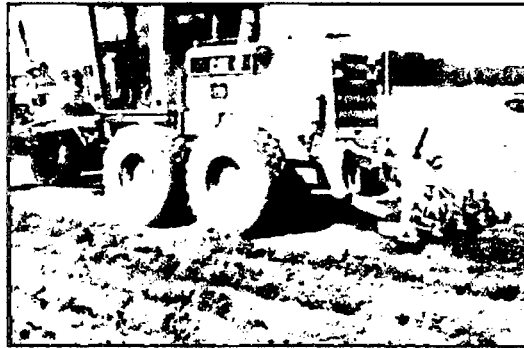


Fig. 18 Escarificación antes de la aplicación de la cal.



Fig. 19 Camellón utilizado para contener la cal antes de la mezcla

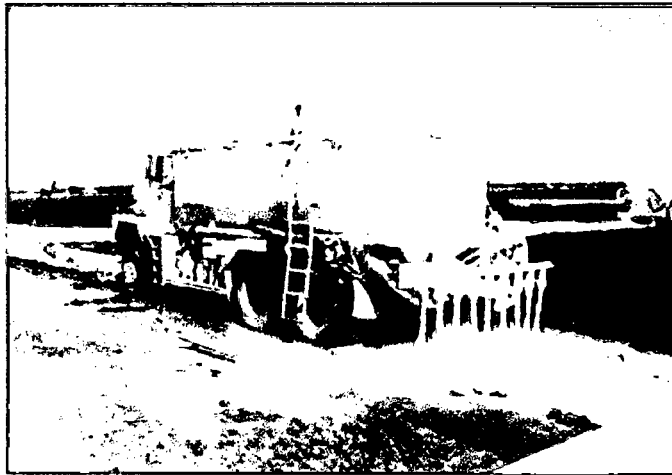


Fig. 20 Ejemplo de aplicación de lechada (Manual de estabilización de suelo tratado con cal, 2004).



Fig. 21 Secado del material arcilloso.



Fig. 22 Preparando material para el ensayo proctor modificado cal al 0%.





Fig. 23 Ensayo proctor modificado cal al 0%.

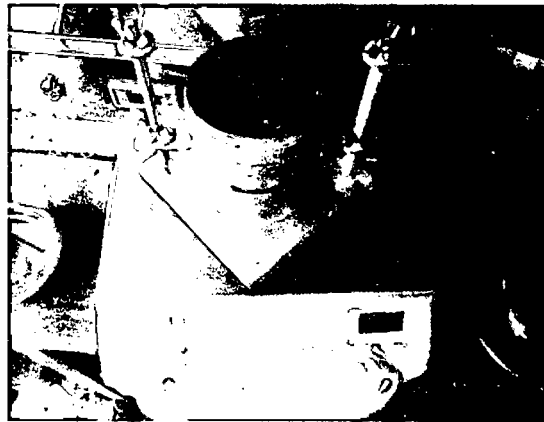


Fig. 24 Peso de molde proctor más muestra compactada cal al 0%.

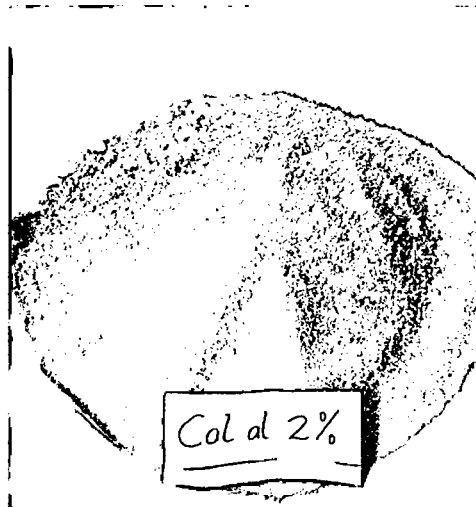


Fig. 25 Muestra con adición de cal al 2%.



Fig. 26 Muestras para ensayo proctor modificado cal al 2% con diferentes contenidos de humedad.

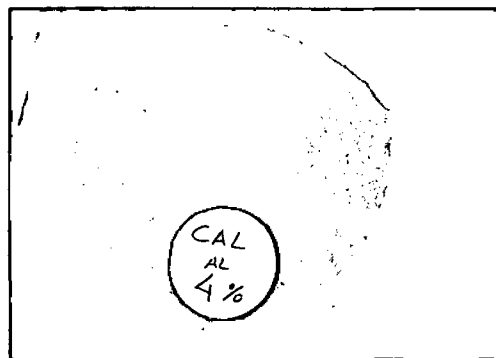


Fig. 27 Muestra con adición de cal al 4%.

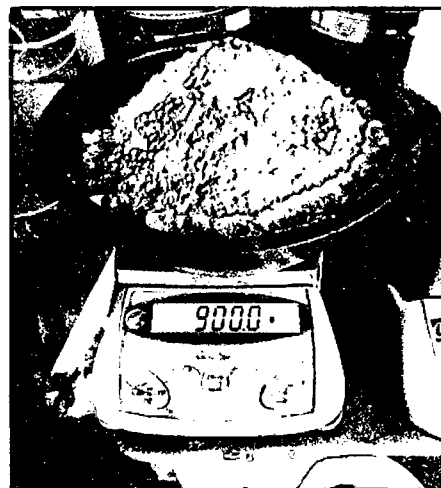


Fig. 28 Pesado de cal al 6% para un peso de suelo de 15 Kg.

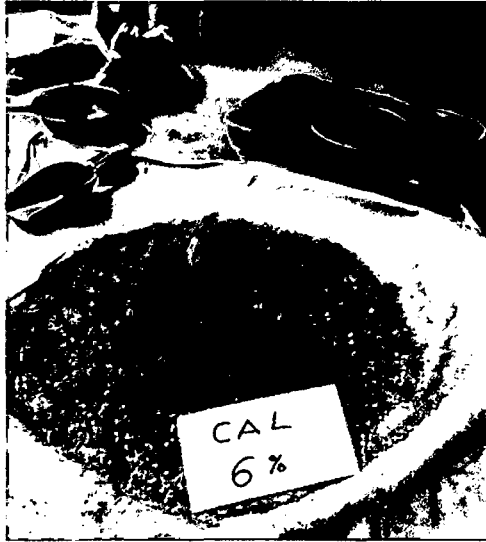


Fig. 29 Muestra con adición de cal al 6%.



Fig. 30 Muestras preparadas con cal al 6% y con diferentes humedades para ensayo de proctor modificada.



Fig. 31 Forma de medición del agua para los ensayos proctor modificado.



Fig. 32 Muestras para ensayo de C.B.R. con cal al 0% y 2%.

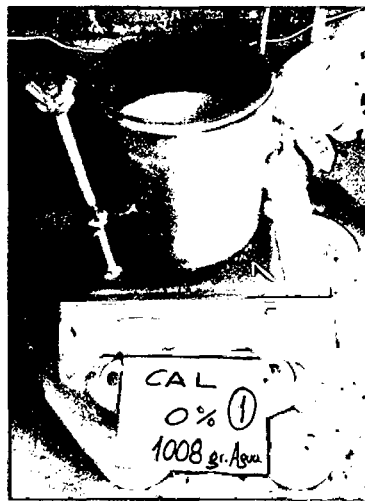


Fig. 33 Peso de molde más muestra compactada y cal al 0%.

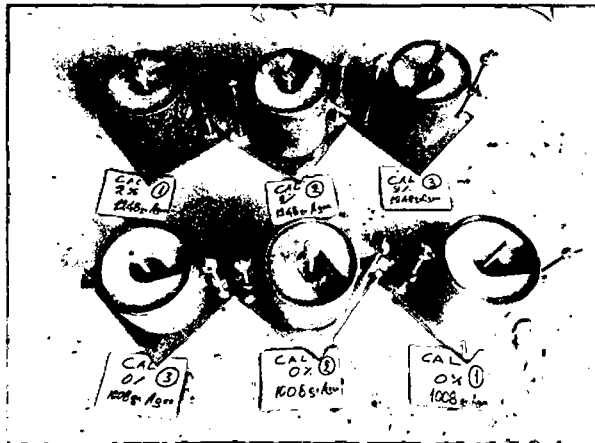


Fig. 34 Muestras cal al 0% y 2% listas para ensayo de hinchamiento.



Fig. 35 Muestras para ensayo de limites líquido y plástico con porcentajes de cal al 2%, 4% 6%.



Fig. 36 Ensayo CBR para lecturas de expansión.

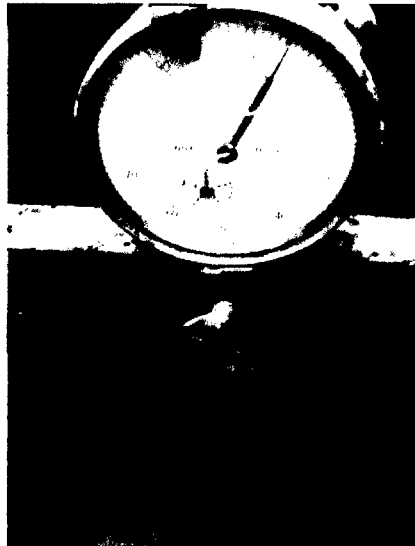


Fig. 37 Control de expansión.

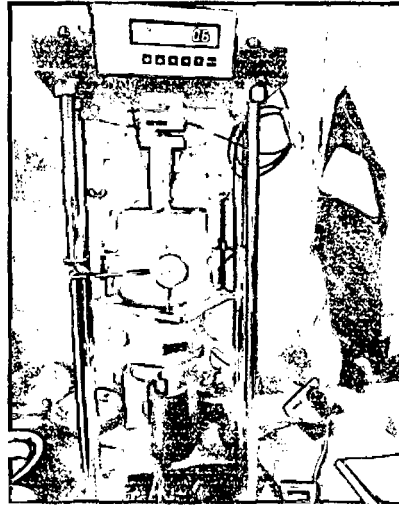


Fig. 38 Ensayo de penetración

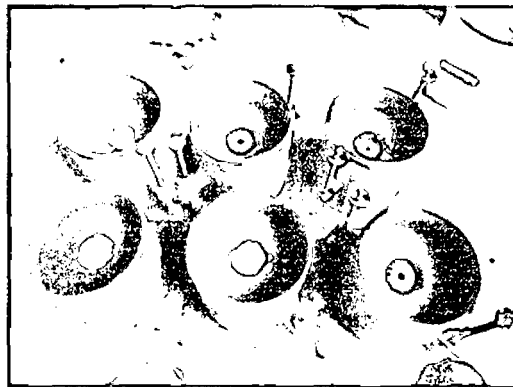


Fig. 39 Muestras ensayadas CBR.

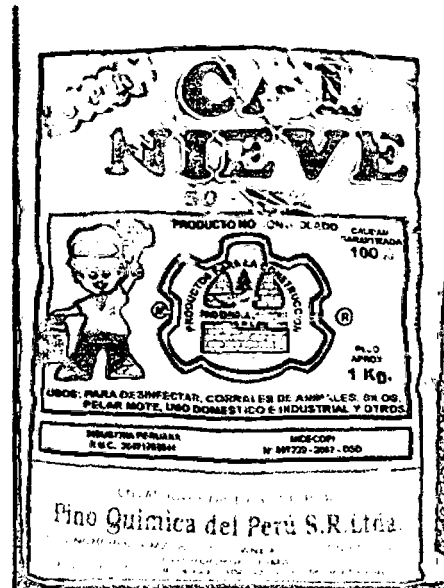


Fig. 40 Cal que se utilizó en el proyecto