

## **1.1.- SUBRASANTES**

### **1.1.1.- INTRODUCCIÓN**

En muchos casos, esta capa no se considera como perteneciente a la carpeta estructural firme, sino a la explanación u obra de tierra. Sin embargo, su función es muy importante respecto de aquél, ya que le dota de una base uniforme y de buena capacidad portante. Los materiales que se emplean en su confección son suelos seleccionados, a ser posible procedentes de la propia excavación o de los alrededores de la obra.

Al conseguir un cimiento de características uniformes, los espesores de las capas superiores pueden ser constantes, lo que es muy conveniente desde el punto de vista constructivo, económico y de proyecto. La situación contraria implicaría constantes cambios en los espesores del firme, según las características locales de la explanada natural.

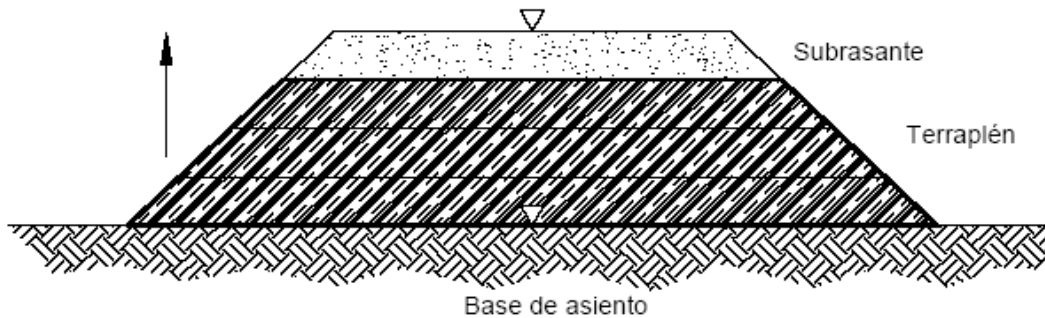
Actualmente se tiende a cuidar la terminación de la subrasante natural, por lo que esta capa se halla en desuso.

### **1.1.2 CONDICIONES GENERALES PARA LA FORMACIÓN DE LA SUBRASANTE**

De la calidad de ésta depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta carpeta se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas de tránsito.

Es necesario tener en cuenta la susceptibilidad a la humedad, del suelo, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen. Los cambios de volumen en un suelo expansivo, pueden ocasionar graves daños a las estructuras que se apoyan sobre éste, por esta razón al construir un pavimento se debe intentar tener un control muy riguroso con respecto a las variaciones volumétricas del mismo, a causa de la humedad.

La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización físico-química con aditivos como el cemento, la cal, el asfalto, en nuestro caso puzolana natural-cal en este caso, entre otras.



*Figura N° 1.1: Ubicación de la Subrasante*

**DENOMINACIÓN:** es la fundación sobre el cual el paquete estructural será construido.

Fig. 1.1.

- Como material de fundación, se debe establecer cuál es su resistencia mecánica y específicamente ante la presencia de cargas.
- Se busca la relación entre la carga y la deformación unitaria.
- La resistencia varía con las condiciones de humedad, compactación.
- Deben representarse en laboratorio las mismas condiciones del proyecto.

Tiene una gran influencia en las operaciones de construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo. Las subrasantes inestables presentan problemas relativos a la colocación y compactación de los materiales de base y/o subbase y no dan soporte adecuado para las subsiguientes operaciones de pavimentación.

Frecuentemente, las deficiencias en la construcción debidas a problemas de la subrasante no se detectan por encontrarse “ocultas” en el pavimento final; sin embargo pueden aparecer en el pavimento después de la exposición al tráfico y al medio ambiente.

Las respuestas estructurales de un pavimento (esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos) son influidas significativamente por la subrasante. Un gran porcentaje de las deflexiones en la superficie de un pavimento se puede atribuir a la subrasante.

Por ser la deflexión de la superficie un criterio de diseño, es necesario asegurar que la caracterización de la subrasante sea la adecuada.

Las propiedades requeridas de la subrasante incluyen la resistencia, la fácil compactación, la conservación de la compactación, la estabilidad volumétrica.

Los suelos son altamente variables y sus propiedades cambian a lo largo del proyecto, en medida de que existan cambios en la humedad, en la densidad o se establezcan influencias ambientales, es decir, que las propiedades de la subrasante cambian con el tiempo.

Las subrasantes deben cumplir las siguientes condiciones básicas:

**EJECUTABILIDAD:** significa que sea posible su puesta en obra en debidas condiciones, y de forma tecnológica (es decir, con medios mecánicos de alto rendimiento). En especial, este aspecto hace referencia a los suelos excesivamente húmedos o secos, que son los que plantean problemas a ese respecto.

**ESTABILIDAD:** se refiere a que la propia estructura de tierra sea estable frente al deslizamiento, tanto desde el punto de vista interno (la propia sección de la subrasante, con superficies de deslizamiento que se inscriban fundamentalmente en su seno) como extremo, en el sentido que exista suficiente estabilidad sobre el terreno en el que se asientan.

**DEFORMABILIDAD:** hace referencia a que las deformaciones (verticales-asientos, u horizontales-desplazamientos) que se produzcan, una vez que se construya el firme

a soportar, deben ser admisibles y compatibles con la funcionalidad y servicio del mismo, incluyendo la regularidad superficial de la capa de rodadura.

En este sentido, han de tenerse en cuenta los asentos, o movimientos totales y sobre todo los diferenciales, que pueden dar lugar a agrietamientos longitudinales o transversales del firme, disfunciones del servicio del firme, etc.

Dentro de este contexto, se deben tener en cuenta todo tipo de fenómenos que pueden originar movimientos; y por tanto, además de las deformaciones propias del relleno, hay que considerar los posibles fenómenos de hinchamiento-retracción debido a cambios de humedad-temperatura, los asentos del cimiento (apoyo sobre suelos blandos), etc.

**DURABILIDAD:** que hace referencia, por último, a que la obra ha de ser duradera (vida de servicio útil) y también garantizar la permanencia de las condiciones de servicio durante ese periodo de diseño (amortización de la inversión).

En ese sentido, son básicos los procesos de alteración y sus factores más influyentes, como el agua, la temperatura, y los agentes biológicos o químicos Y por supuesto, el tipo de material utilizado en el propio relleno.

Los principios básicos que guían el comportamiento de un suelo se basan en la tecnología de su construcción, abarcan una gama muy amplia incluyen la estabilidad de taludes, los materiales expansivos, etc. Pero en aquéllas más específicas, cabe centrar la atención en unos cuantos aspectos, como son: materiales, compactación y exigencias sobre el producir obtenido (controles y requisitos que deben cumplir las magnitudes básicas).

De un modo simplificado, en la tabla 2.1 se exponen los aspectos o condiciones más importantes y globales a ser contempladas: las denominadas características intrínsecas del material, el estado de consistencia-humedad, y la tecnología constructiva.

Las características intrínsecas se refieren a las propiedades del material como tal, independientemente de la obra de tierra, y contemplan aspectos tales como: granulometría, plasticidad, expansividad, etc., que en un principio resultaron de extrema importancia, pues su utilización se basaba casi exclusivamente en las clasificaciones deducidas de estas propiedades índices.

El estado de consistencia, o humedad, ha sido tenido siempre en cuenta como esencial, pues está ligado íntima y directamente a la trabajabilidad, y en definitiva a las labores esencialmente constructivas (incluyendo no sólo la compactación, sino también el transporte, extendido, etc.). No obstante, ha sido en tiempos más recientes cuando se le ha dado a la humedad una importancia más esencial y científica, por la gran trascendencia que tiene en la estructura de los suelos compactados, y en su comportamiento posterior (sobre todo en suelos de carácter expansivo, colapsable, etc.)

#### **CONDICIONES A CONTEMPLAR EN UNA SUBRASANTE**

<b>CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL MATERIAL</b>
Granulometría Plasticidad Compactación Proctor Capacidad Portante C.B.R Expansividad
<b>ESTADO DE CONSISTENCIA</b>
Humedad natural
<b>TECNOLOGÍA CONSTRUCTIVA</b>

Extracción
Transporte
Extensión
Compactación

Fuente: Explanaciones y drenaje

*Tabla N° 1.1: Condiciones a contemplar en una subrasante*

Además de la humedad, debe tenerse presente la climatología como un factor extrínseco importante, así como las posibilidades de modificación de la misma. Por último la tecnología constructiva debe contemplar no sólo el proceso de la propia compactación, sino también el de extracción, transporte y extendido.

La variación conceptual que se ha venido produciendo en el modo de contemplar este tipo de obra, ha ido restando importancia a la cuestión ligada a las características del propio material, para poner énfasis en el producto final obtenido (que es el bien y objetivo deseable, al margen de con qué y cómo se haya producido).

A su vez, ello ha conllevado a ir variando las exigencias y normativas al respecto, sobre todo en lo que se refiere a su clase, así como los sistemas o métodos de control. Se ha basado, en la línea antes señalada, de centrar la atención sobre las características intrínsecas del material, a poner el énfasis en el producto, y en concreto en su comportamiento geomecánico: resistencia y deformabilidad (teniendo en cuenta la gran influencia de la humedad y su evolución).

En ese sentido, y como factor básico de ese comportamiento, se debe considerar la estructura del material compactado como un elemento básico que determina su comportamiento, y por ello, además de la densidad, que ha sido el aspecto esencial que se ha venido teniendo en cuenta históricamente, debe ser considerada la humedad como el otro dato básico.

## **CARACTERIZACIÓN DE LA SUBRASANTE**

Recopilación y análisis de información:

- Informes previos de estudios de suelos en el área de proyecto.
- Interpretación de cartas geográficas o imágenes satelitales
- Estudios geológicos

#### **CARACTERIZACIÓN FÍSICA:**

- Granulometría
- Límites de Atterberg

#### **FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LA SUBRASANTE**

##### **TIPO DE SUELO Y SUS PROPIEDADES**

La mayoría de los tipos de suelos se analizan a partir de su clasificación en sistemas de uso general que se basan en la textura y la plasticidad, el tamaño y la distribución granulométrica de sus partículas, propiedades que tienen una influencia significativa en el comportamiento de los suelos bajo carga.

##### **INCIDENCIA DE ARCILLAS EN OBRAS VIALES**

La incidencia de las Arcillas, radica en que: constituyen en alto porcentaje los suelos naturales (Subrasantes), con mayor énfasis en los que geológicamente aun se encuentran en formación.

Constituyen la fracción fina de los materiales arcillo-gravosos, de fuente o de cantera, que empleamos para constituir las capas intermedias de las estructuras viales; incrementan los costos al hacer presencia, indeseable, en los materiales que empleamos para construir las bases y en los agregados de las rodaduras de nuestras vías. Finalmente son las causantes de la contaminación y deterioro de los caminos y de las rodaduras, en las vías sin pavimento.

El hombre hábilmente ha ido desarrollando e implementando tecnologías para solucionar dichos problemas, dedicando gran parte de la Investigación y la Ciencia a

analizar los materiales disponibles y a estudiar sus aplicaciones, para obtener la mejor estructura vial, que se adaptará, en cada época y en cada oportunidad a sus requerimientos. En su afán de encontrar estructuras viales, durables y confiables, descuido, hasta hace algunos pocos años, el aspecto económico y el deterioro ambiental que estaba infringiendo a su entorno. Incluso abandonó y olvidó procedimientos y tecnologías que antes le habían sido útiles y que conservando los recursos naturales producían, menor deterioro ecológico.

Las actuales estructuras viales, están constituidas por una serie de capas superpuestas, compuestas de materiales cuyas características, requerimientos y exigencias, varían de una capa a otra. La función de estas diferentes capas es ir disipando y redistribuyendo las cargas que le infringe el tráfico, de manera tal que en la medida que dichos esfuerzos van penetrando la estructura, menor será su incidencia en la capa inmediatamente inferior, hasta llegar a la Subrasante o suelo natural, siendo necesario evitar, en los diseños, sobrepasar la capacidad portante de este estrato.

Todas las Estructuras viales que el hombre ha diseñado, desde siempre, incluyendo las actuales, se basan en dos premisas: La primera de ellas considera las cargas que deberá soportar la vía, durante el tiempo de vida útil que requerimos. Es un dato estadístico, muy difícil de modificar.

La segunda premisa es la Capacidad portante del Suelo Natural sobre el que debemos soportar nuestra vía. Actualmente se toma, como unidad de medida de dicha Capacidad, la establecida por la Universidad de California (E.U.A.) y que se denomina **CBR**.

En la medida en que mayor sea la Capacidad portante de este estrato menor será el espesor de la estructura requerida, para una carga o esfuerzo determinados, lo que redundará en economía, en todos los aspectos y menor deterioro ambiental.

Cuando la capacidad portante del suelo natural no es la adecuada o es muy baja, se busca mejorar la calidad del suelo ya sea adicionando materiales que le ayuden a

mejorar las características de dicho estrato o sustituyéndolo por otro, de ahí nace la idea de estabilizarlo.

En nuestro país no existe una empresa que brinde sus servicios específicamente para estabilizar vías, a diferencia de los países desarrollados, que ya tienen a su disposición empresas que brindan específicamente servicios para este fin, tal es el caso de la empresa **Estabilizadora de Vías “Esta Vías”** en Colombia, que se creó con el fin específico de asesorar y colaborar con las entidades, tanto de carácter Público como Privado, que tienen a su cargo, a nivel Nacional e Internacional, los diversos aspectos Técnicos de los carretables, al poner a su disposición las tecnologías más avanzadas, encaminadas a solucionar algunos de los problemas e inconvenientes que, nos presentan los Suelos naturales o Subrasantes, buscando obtener simultáneamente la mayor Capacidad portante de este estrato; Al igual que otras tecnologías complementarias, que nos permitan obviar las dificultades que, para constituir las diferentes capas de la estructura vial, presentan habitualmente los materiales naturales obtenidos en fuentes o canteras del área de influencia, reduciendo los altos costos y el deterioro ecológico, prolongando simultáneamente la vida útil de las vías y ampliando la cobertura de los escasos presupuestos.

La metodología que se describe a continuación, se emplea en forma independiente, pero representa, una solución técnica, para constituir una estructura vial, dependiendo de los requerimientos, las características y objetivos de cada obra y del nivel al que se quiere llegar en la constitución de la estructura vial.

### **1.1.3 CONSTRUCCIÓN DE LA SUBRASANTE**

En primer lugar hay que preparar la superficie de asiento de la subrasante, procediendo al desbroce, a la excavación y retirada de materiales inadecuados y a la escarificación y compactación del área afectada. Cuando se trata de excavación en roca, en las deberán hacerse de forma que se mantenga una cierta uniformidad geométrica y que se evite el lanzamiento del material fuera del área de excavación.

También se procederá a la captación y conducción de aguas superficiales y al drenaje profundo en los puntos necesarios.

La construcción de la subrasante tiene lugar con una secuencia que se describe a continuación.

### **A) EXCAVACIÓN, TRANSPORTE Y EXTENSIÓN DEL SUELO**

Los suelos proceden de desmontes de la traza o de préstamos próximos al lugar de empleo reuniendo las características requeridas por la obra.

El espesor máximo de las capas viene limitado por la maquinaria de compactación que se emplee, el tipo de suelo y el grado mínimo de compactación que se desee alcanzar, variando así en la práctica desde 0,15m. hasta 0,60 - 0,80m. y aún más con compactadores pesados y suelos granulares fácilmente compactar.

Antes de extender una capa es necesario comprobar que la subyacente ha sido compactada adecuadamente y que no se encuentra encharcada o saturada de agua. Es frecuente dar una pequeña pendiente transversal para evacuar las aguas de lluvia caídas durante la ejecución. Los trabajos deben interrumpirse con temperaturas ambientes bajas (inferiores a - 2 °C), suelos helados, y cuando se produzca una lluvia de moderada a intensa.

### **B) HUMECTACIÓN O DESECACIÓN DEL SUELO**

Influyen en la resistencia y en el comportamiento bajo carga repetida de los suelos de la subrasante. Durante la construcción, los suelos de subrasante pueden ser compactados a una densidad y humedad específicas, que permiten establecer valores de resistencia para el diseño del pavimento. Sin embargo, tanto el contenido de humedad como la densidad pueden cambiar durante la construcción o después de ella.

PROBLEMAS:

- Compresibilidad (en general diferencial)
- Inestabilidad

- Desección (Asentamientos, agrietamientos)
- La vegetación acentúa las deformaciones

Una vez extendida la capa se procede, si es necesario, a su humectación con un camión cisterna para que el suelo alcance una humedad próxima a la óptima de compactación, función del suelo y del proceso elegido. Se comprende que con capas de gran espesor sea muy difícil conseguir una adecuada distribución del agua y por tanto una homogeneidad aceptable del grado de compactación.

En ocasiones, sin embargo, la humedad natural del suelo es excesiva, lo cual puede constituir un impedimento para alcanzar la densidad prevista por más que se aumente la energía de compactación. Cuando este caso se deba a precipitaciones atmosféricas puede ser suficiente esperar a su desecación natural o acelerada mediante escarificación. Si se trata en cambio de suelos finos limo-arcillosos con humedades próximas al límite plástico no podrá contarse con su desecación por oreo y habrá que prescindir de ellos o proceder a su mezcla con cal, escorias o cenizas volantes, u otros.

Con este tratamiento se consigue una modificación granulométrica aparente por formación de grumos y un aumento de la humedad óptima de compactación, que se aproxime a la natural del suelo.

Las estabilizaciones son, sin embargo, tratamientos costosos para ser utilizados en el núcleo de terraplenes, por lo que suelen reservarse para la Subrasante.

### **C) COMPACTACIÓN DE LAS CAPAS**

La compactación de la subrasante tiene lugar generalmente en toda su anchura. Las capas se compactan mediante varias pasadas de máquinas compactado ras de diferente tipo.

El objeto de la compactación es alcanzar una densidad seca mínima que confiera una cierta estabilidad al suelo, compactado según un proceso económicamente justificado. Para tener en cuenta la distinta compactibilidad de los suelos suele exigirse una

densidad en términos relativos, como ser que en las subrasantes, se alcance una densidad no inferior al 95 % de la máxima obtenida con el mismo suelo en el ensayo proctor. En la coronación se exige como mínimo un valor del 100 % de la densidad máxima proctor normal.

Estos valores deben considerarse actualmente como mínimos, aunque razonables con suelos de grano fino de difícil compactación. Con suelos granulares pueden prescribirse valores mínimos de 95 a 100 % de la densidad máxima Proctor modificado.

Naturalmente existen diferencias entre la compactación en obra y la compactación obtenida en el laboratorio, por ejemplo, el apisonado Proctor. Para un suelo dado que tenga una cierta humedad, la densidad obtenida dependerá de las características del compactador empleado (principio de compactación, peso, dimensiones, etc.), del espesor de la capa compactada y del número de pasadas o veces que el compactador pasa por un punto de la superficie de la capa. También pueden influir otras características propias de los rodillos vibratorios como la frecuencia, amplitud, relación masa suspendida/masa vibrante y características comunes a todo tipo de rodillos como la velocidad y tipo de tracción.

En cada caso será necesario determinar el espesor máximo de la capa y el número mínimo de pasadas necesario para alcanzar la densidad exigida.

La humedad óptima determinada en el laboratorio sólo puede considerarse como un valor aproximado del óptimo de obra. Mientras que los suelos secos pueden regarse hasta alcanzar una humedad aceptable, los suelos con humedades naturales elevadas pueden ser de difícil (e incluso imposible) compactación. Esto se refiere particularmente a los suelos cohesivos con humedades naturales próximas al límite plástico. En este caso puede producirse una deformación recuperable que obligue a una compactación gradual empezando con algunas pasadas de máquinas ligeras, al aplazamiento de la compactación e incluso al rechazo del material.

El trabajo de los equipos de compactación debe organizarse de forma que ésta sea lo más uniforme posible, es decir, que todos los puntos de la capa reciban el mismo número de pasadas de rodillo. En este sentido, es conveniente controlar y ordenar el tráfico de obra de forma que no lleguen a formarse roderas en la superficie de las capas de ejecución.

#### **1.1.4. LOS SUELOS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN DE LAS SUBRASANTES**

Los suelos necesarios para formar las subrasantes se obtienen de los desmontes de la traza o de préstamos adecuados. Los mejores suelos serán aquellos que son fáciles de compactar y que una vez compactados son resistentes a la deformación, poco sensibles a los cambios de humedad, especialmente en lo referente a cambios de volumen, o a la helada en áreas sometidas a muy bajas temperaturas. Por ello son preferibles los suelos granulares de granulometría continua, con un porcentaje adecuado de finos poco plásticos y sin piedras de gran tamaño. Las arenas uniformes sin finos son difíciles de compactar.

Los suelos de grano fino o materiales limo-arcillosos pueden ser utilizados, salvo que se trate de arcillas muy plásticas o de limos muy compresibles de elevado límite líquido. Con frecuencia estos suelos de grano fino, de reducida resistencia, tienen también unas humedades naturales excesivas que dificultan o imposibilitan su puesta en obra.

Son suelos inadecuados para su empleo en subrasantes los suelos orgánicos o con materia orgánica (hojas, hierba, raíces, desechos orgánicos y otros materiales putrescibles), por ello no se empleará la capa de tierra vegetal, ni materiales procedentes de marismas, turberas, etc. Tampoco es conveniente emplear escombros y vaciados heterogéneos, que pueden dar lugar a asientos diferenciales en servicio.

En cambio es conveniente estudiar la posibilidad de empleo de subproductos y desechos industriales locales, que en algunas zonas presentan problemas ecológicos y de acopio: cenizas volantes, desechos de cantera, ciertos materiales minerales,

escorias metalúrgicas, subproductos de industrias químicas, materiales puzolánicos, etc.

Cuando los suelos disponibles no satisfagan las exigencias generales será necesario realizar un estudio detallado de laboratorio sobre sus características, para evaluar la posibilidad de su empleo y fijar en ese caso las especificaciones particulares para su puesta en obra.

Este estudio permite muchas veces que se utilicen suelo, con procedimientos especiales de extracción, extendidos, compactación o estabilización, con los consiguientes beneficios económicos y medioambientales.

#### **1.1.4.1 SUBRASANTES SOBRE SUELOS BLANDOS**

Ocasionalmente, el trazado de la carretera puede atravesar zonas sobre las que existen depósitos de suelos blandos, tales como arcillas, limos e incluso turbas. Es bastante conocido que este tipo de materiales presentan un **nefasto comportamiento** como soporte de cualquier tipo de obra de tierra.

Ante esta situación cabe obrar de dos posibles maneras: si la capa en cuestión tiene poca potencia puede ser económicamente viable su eliminación empleando maquinaria de movimiento de tierras; sin embargo, un mayor espesor obligará a replantear la estrategia, actuando directamente sobre el terreno existente para intentar mejorar sus cualidades resistentes.

A priori es difícil establecer qué espesor marca la frontera entre ambos métodos, ya que existen gran cantidad de variables específicas para cada caso que inclinarán la balanza hacia una u otra solución.

Lo que sí que es conveniente realizar siempre en este tipo de suelos es un **estudio geotécnico** que caracterice el terreno, de forma que puedan estimarse de forma más precisa la estabilidad y los asientos admisibles del terraplén. También es recomendable hacer un estudio comparativo de las dos soluciones –eliminación o mejora estructural- para determinar cuál es la más idónea.

#### **1.1.5 CONTROL DE CALIDAD**



la densidad seca alcanzada en el ensayo de apisonado Proctor. Las prescripciones técnicas especifican un valor mínimo. Conviene tener en cuenta que un punto de porcentaje no es una cosa sin importancia, puesto que un material completamente suelto tiene ya una densidad del orden del 85 % de la de referencia.

El control de la humedad se realiza en los suelos con porcentajes de arcilla que puedan influir en la capacidad de soporte y el de la porosidad en suelos o rocas evolutivas potencialmente. Como se trata de controles muestrales de los que se pretende inferir las características de la totalidad de la superficie ensayada, conviene aplicar algunos principios estadísticos sencillos:

- Debe ante todo definirse la porción que se aceptará o rechazará según los resultados de los ensayos.
- Una vez elegido el efectivo de la muestra, para que ésta no introduzca ningún sesgo, el emplazamiento de los ensayos debe elegirse de forma aleatoria, evitando ir a los sitios peores, o a los que al operador le parecen representativos.
- Una vez realizados los ensayos, su resultado debe ser analizado por técnicas estadísticas. El tener algunos resultados muestrales por debajo del límite no significa obligatoriamente que la porción deba ser rechazado, es decir, recompactado. Así, con 5 unidades aleatorias por muestra pueden admitirse resultados individuales de la densidad de hasta un 2 %, inferior al valor mínimo especificado, siempre que la media aritmética del conjunto de la muestra no sea inferior a ese valor.

El contenido de humedad, aunque no suele especificarse en los pliegos de condiciones, es importante que se encuentre próximo al valor correspondiente de la máxima densidad Proctor, para evitar fenómenos de pérdida de resistencia en la mayoría de los suelos. A este control de producto terminado pueden asimilarse otros sistemas, como los ensayos de carga con placa o los ensayos de huella.

En cambio en el control de procedimiento, se fija el espesor máximo de la capa compactada y el número mínimo de pasadas en función de las características del

suelo y el tipo de compactador; en este caso basta con vigilar el proceso de compactación. Este método se adapta mejor a las obras de grandes volúmenes o con materiales grueso.

## 1.2 SUELOS ARCILLOSOS

Las arcillas son, en el sentido mineralógico, cristales microscópicos con átomos dispuestos en planos.

Muchas arcillas se expanden considerablemente cuando se agrega agua y luego se contraen con la pérdida de la misma. Bajo este principio, se puede establecer que un suelo expansivo es aquel que presenta un incremento en el volumen cuando se encuentra sometido a la humedad y el cual tiende a su estado inicial cuando esta se pierde. Esto se debe principalmente a la capacidad de absorción que tiene este tipo de suelo. Los cambios generados se pueden ver reflejados durante la construcción y operación de cualquier tipo de estructura.

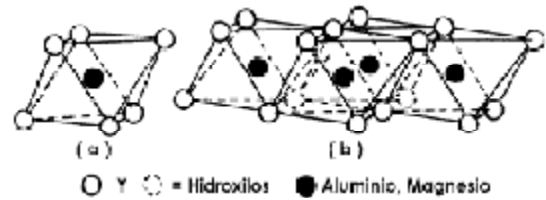
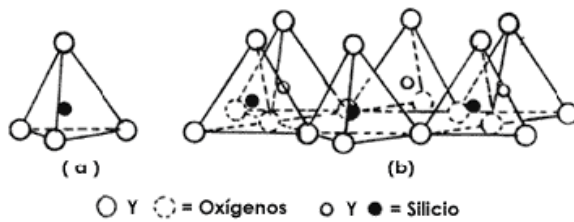
La Arcilla se puede definir como la fracción de roca, compuesta por partículas inferiores a  $2\mu\text{m}$ . Está formada esencialmente por silicatos alumínicos hidratados de estructura reticular aplanada.

### 1.2.1 CARACTERÍSTICAS

Al realizar un análisis mineralógico y químico de este tipo de suelo, se puede establecer que está compuesto principalmente de minerales como la montmorillonita e illita entre otros, los cuales contienen en su estructura átomos de aluminio y silicio, que de acuerdo a la valencia que tienen se pueden combinar con los átomos de oxígeno, los cuales conforman una serie de cadenas que determinan las características de las arcillas.

Los minerales arcillosos, son filosilicatos hidratados que se presentan en cristales muy pequeños. Debido a su estructura **crystalina**, las arcillas son intercambiadores de iones muy eficaces. Las arcillas poseen una carga neta superficial negativa que les permite absorber cationes y materia orgánica.

Los minerales de arcilla poseen dos componentes **estructurales** básicos: uno es el tetraedro de Silicio - Oxígeno y el otro es el octaedro, en el cual un átomo de aluminio, magnesio y/o hierro es rodeado por seis aniones (2 ó 4 oxígenos y 4 ó 2 hidróxidos).



**Figura 1.** Tetraedro de Silicio – Oxígeno

**Figura 2.** Octaedro Aluminio / magnesio - Hidróxidos

Los filosilicatos que componen las arcillas pertenecen fundamentalmente a cuatro grupos: el del Caolín, el de la Montmorillonita, el de la Mica arcillosa (fundamentalmente illita), y el de la Clorita.

Los minerales arcillosos pueden proceder de la alteración de la roca magmática o metamórfica, y después del transporte, dar arcillas detríticas (es el caso más frecuente). Pueden formarse en una cuenca de sedimentación en cuyo caso son minerales arcillosos neoformados. En otros casos pueden proceder de una reorganización mineralógica durante la diagénesis (minerales arcillosos diagenéticos). Las arcillas detríticas son corrientemente denominadas arcillas primarias o heredadas, y las otras arcillas secundarias.

Desde el punto de vista mineralógico, la Arcilla engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a  $2\mu\text{m}$ ).

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula. Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.)

pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan las  $2\mu\text{m}$ .

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

### 1.2.2 TIPOS DE ARCILLAS

Las principales arcillas, son: la caolinita, que presenta una baja capacidad de intercambio y dos capas de cationes, se llama arcilla 1/1 (capa tetraédrica + capa octaédrica); la illita y la montmorillonita que son arcillas 2/1 con una capacidad de intercambio media en la illita y alta en la montmorillonita (arcilla hinchable o expansiva).

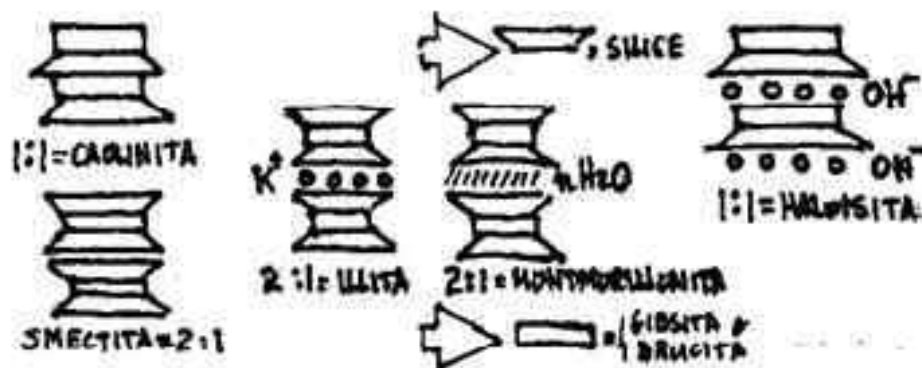


Figura 1.3. Representación simbólica de las arcillas. La estructura fundamental se establece con un rectángulo y uno o dos trapecios. El trapecio representa un tetraedro de silicio y el rectángulo un octaedro de Aluminio (gibbsite) o de Magnesio (brucita). Según Juan Montero, curso de Geología.

Los minerales de arcilla producirán caolinita si el clima es tropical drenado y en especial cuando el material parental es granito, illita si se da en clima seco y frío y montmorillonita, que se asocia a bentonita si se da en suelos alcalinos pero mal drenados.

- **La caolinita.** Es rica en sílice y aluminio, colores: blanco, amarillo, verde y pardo. Muestra una perfecta exfoliación, es apreciada para fabricar utensilios.
- **La illita.** Está ligada por potasio, con sílice y aluminio; normalmente amarilla o roja, si tiene hierro, o blanca si es pura.
- **La montmorillonita.** Presenta magnesio o aluminio hidratado entre láminas de silicio. Tiene en su estructura molecular  $n$  moléculas de agua; el parámetro  $n$ , variable, le da su característica de expansiva.

Para distinguir entre limos y arcillas debemos precisar que la cohesión entre las partículas de arcilla es mayor, tanto en el estado seco como húmeda. Un trozo de arcilla seco es duro y resistente, el de limo tiende a pulverizarse. Dentro de ciertos grados de humedad la arcilla es plástica, mientras el limo trata de agrietarse. Los granos de arcilla son más finos y se precipitan tardíamente en aguas tranquilas, siendo el tiempo de asentamiento para el material disperso en una vasija, de horas a días para la arcilla y de minutos u horas para los limos.

### 1.2.3 EFECTO DE LAS ARCILLAS EN OBRAS CIVILES

Para el desarrollo de cualquier clase de obra civil siempre se debe tener en cuenta el tipo de material sobre el cual se construirá, debido a que las características de este material determinarán el diseño estructural necesario, además se deben analizar las condiciones ambientales que intervienen en la zona del proyecto.

Por ejemplo en casos en donde el material sobre el que se desarrolla el proyecto es arcilloso hace que se presenten condiciones desfavorables incrementando el valor de la obra y haciendo más complejo el diseño.

Las arcillas, al perder casi por completo su resistencia al estar en contacto con el agua, exigen un estricto control de los niveles freáticos del terreno, de lo contrario se podrían presentar problemas de estabilidad del suelo afectando las obras civiles de diversas maneras, como son los asentamientos diferenciales o disminuyendo la vida útil del proyecto.

Algunas soluciones a problemas ocasionados por los suelos expansivos. Debido a que se presenta una variación en el comportamiento de los suelos en cuanto a su volumen, las estructuras se pueden ver afectadas debido principalmente a las fuerzas de levantamiento provocadas sobre la cimentación, haciendo que se presente desde una variación en el nivel de fundación, hasta la falla misma.

Para contrarrestar los efectos provocados por este tipo de suelo se sugiere las siguientes soluciones:

- Reemplazar una porción de suelo expansivo, por otro tipo de suelo, preferiblemente de tipo granular, con el fin de que el peso generado por el relleno no permita que se expanda el suelo restante.
- Adecuación de estructuras con el fin de que no permita el paso del agua hacia el suelo de fundación.
- Aplicación de aditivos que no permita que se genere algún tipo de expansión, cuyo procedimiento consta en tomar una porción de suelo, el cual es remoldeado con alguna clase de aditivo y luego es adecuado sobre el terreno, de manera que este sea compactado.

Teniendo en cuenta las anteriores recomendaciones se sugiere:

- Controlar la humedad del sitio de trabajo, procedimiento que se realiza mediante la excavación hasta un determinado punto, luego se extiende una capa plástica y se vuelve a rellenar el sitio, pero a la parte superior de la capa se le deben adecuar unos drenajes o impermeabilizantes.

El primer paso es identificar el suelo para evidenciar el potencial de cambio volumétrico, para ello se recurre a los límites de Atterberg, fundamentalmente a:

- Índice de Plasticidad
- Expansión probable al pasar de estado seco a saturado

Están compuestos por partículas minerales que tienen una gran afinidad por el agua, la absorben del medio ambiente y la incorporan a su estructura molecular. Las arcillas montmorilloníticas poseen esta propiedad.

La inestabilidad mostrada por estos suelos se debe a su estructura molecular, la que ocasiona una débil unión entre sus partículas minerales.

La afinidad que dichas arcillas tienen por el agua es la causa principal del hinchamiento o expansión que experimentan, con fuertes presiones de empuje o levantamiento cuando se saturan. Inversamente, se presentan altas contracciones y agrietamientos cuando se secan. Generalmente, los suelos expansivos caen dentro del grupo de las arcillas finas de alta plasticidad (CH) y en menor proporción con las de baja plasticidad (CL).

## **EFFECTOS**

- Levantamiento diferencial
- Agrietamiento

La expansión depende de:

- Cambios de humedad
- Presiones aplicadas

## **1.3 MATERIALES Y REACCIONES PUZOLÁNICAS**

### **1.3.1 MATERIALES PUZOLÁNICOS**

#### **1.3.1.1 ORIGEN E HISTORIA DEL TÉRMINO PUZOLANA**

Recibe su nombre de la población de Puzzuoli, en las faldas del Vesubio, donde ya en tiempos romanos era explotada. Después el término se extendió a todos aquellos materiales que por sus propiedades similares a la Puzolana, de origen natural, pueden tener usos sustitativos. De hecho hoy una de sus acepciones más comunes es la de la grava que frena los escapes de las curvas en circuitos de competición.

La civilización romana fue la que descubrió todo el potencial que estos materiales podían ofrecer. De esta forma uno de los mejores exponentes que podemos encontrar es el Panteón de Roma. Construido en el año 123, fue durante 1.500 años la mayor cúpula construida, y con sus 43,3 metros de diámetro aun mantiene records, como el de ser la mayor construcción de hormigón no armado que existe en el mundo. Para su construcción se mezcló cal, puzolana y agua; añadiendo en las partes inferiores ladrillos rotos a modo de los actuales áridos, aligerando el peso en las capas superiores usando materiales más ligeros como piedra pómez y puzolana no triturada.

### **2.3.2 DEFINICIONES DE PUZOLANA**

El U.S. Bureau of Reclamation (1952) brinda una definición del término puzolana, incorporada en las normas ASTM(1958) y mantenida hasta hoy como la definición 618-78 (ASTM,1992) que dice: "las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se encuentran finamente divididos y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes".

En Europa, en forma similar se utiliza la definición de puzolanas dada por Massaza en el Quinto Congreso Internacional de la Química del cemento del año 1974, que dice: "se define como puzolanas a aquellos materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y alumina, capaces de reaccionar con cal en presencia de agua y formar por esta reacción compuestos con propiedades cementicias".

Del análisis de las definiciones previas surgen como necesarios para la reacción puzolánica una determinada finura del material, que se expresa fundamentalmente por

la superficie específica de sus partículas; un activador - como el hidróxido de calcio- que genere un ambiente con elevado pH a fin de lograr la solubilización de los compuestos silíceos o aluminosos de débil cristalinidad y la presencia de agua en el medio reaccionante.

La mayoría de los materiales puzolánicos descritos aquí son naturales y subproductos de procesos industriales o agrícolas, que son producidos en grandes cantidades, constituyendo un problema de desperdicio, si permanecen sin utilizar. Incluso si no hubiera otros beneficios, sólo este aspecto justificaría un incremento del empleo de estos materiales. Comparado con la producción y empleo del cemento portland, estos materiales contribuyen a ahorrar costos y energías, ayudan a reducir la contaminación ambiental y, en la mayoría de los casos, mejoran la calidad del producto final.

### **1.3.3 TIPOS DE PUZOLANAS**

Básicamente existen dos tipos de puzolana, llamadas puzolanas naturales y artificiales.

- Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes.
- Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado (pfa), escoria de altos hornos granulada y molida (ggbfs) y ceniza de cascara de arroz (RHA).

#### **A) PUZOLANAS NATURALES**

- Cenizas volcánicas:

Se forman por erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas que son templadas a temperatura ambiente, originando la formación del estado vítreo.

- Tufos o tobas volcánicas (zeolitas):

Producto de la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas y de su posterior cementación diagenética.

- Tierras de diatomeas (diatomitas):

Puzolanas de origen orgánico. Depósitos de caparazones silíceos de microscópicas algas acuáticas unicelulares (diatomeas).

## **B) PUZOLANAS ARTIFICIALES**

- Cenizas volantes: las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
- Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.
- Escorias de fundición: principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.
- Cenizas de residuos agrícolas: la ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

### **1.3.3.1 TIPOS DE PUZOLANAS NATURALES**

#### **CENIZAS VOLCÁNICAS**

- Materiales sedimentarios químicos: sedimentos silicios como la ftanita y el pedernal constituidos por 95 % o más de sílice fibrosa microcristalina y sílice amorfa y cuarzo criptocristalino, cuyo origen se debe a la precipitación de la sílice contenida en el agua de mar. Tierras silíceas, de diatomeas, constituidas por caparazones de diatomeas o radiolarios marinos, formados por sílice amorfa.
- Materiales volcánicos: la efusión del magma y el contacto del mismo con la atmósfera produce un enfriamiento brusco, con la consiguiente formación de rocas duras en las que parte de los minerales no han alcanzado a cristalizar, quedando en

estado amorfo. El vidrio volcánico que constituye parte importante de los basaltos, andesitas y otras rocas de enfriamiento rápido está constituido por sílice amorfa.

- **Materiales Piroclásticos:** El vidrio volcánico está también presente en tobas, tufas, y bombas volcánicas. Estas últimas se encuentran presentes en diversas proporciones en los sedimentos pampeanos como consecuencia de la actividad volcánica cordillerana de fines del Terciario y del Cuaternario (5 millones de años).

La primera puzolana natural empleada en construcciones fue la ceniza volcánica del Monte Vesubio (Italia), encontrada cerca de la ciudad Pozzuoli, que le dio el nombre.

Aunque los compuestos químicos son similares, el material vidrioso formado por el lanzamiento violento de la magna fundida en la atmósfera, es más reactiva con la cal, que la ceniza volcánica formada por erupciones menos violentas.

La generación de puzolanas naturales adecuadas está, por lo tanto, limitada a solo a algunas regiones del mundo.

- Las buenas puzolanas a menudo se encuentran como cenizas finas, pero también en forma de grandes partículas o tufos (ceniza volcánica solidificada), que deben ser triturados para emplearse como puzolana. Sin embargo, la calidad de dichas puzolanas puede variar grandemente, incluso dentro de un mismo depósito.

- Las puzolanas naturales son empleadas igual que las puzolanas artificiales

**Se clasifica según (Norma ASTM C 618):**

**Clase N:** Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tufos y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias.

### **1.3.3.2 TIPOS DE PUZOLANAS ARTIFICIALES**

#### **CENIZA DE COMBUSTIBLE PULVERIZADO (CENIZA VOLANTE)**

- Comparando los procesos de producción de ceniza de combustible pulverizado (pfa), más conocida como ceniza volante, y de cemento portland, ordinario (OPC),

queda claro por que razón la pfa puede emplearse como sustituto parcial de éste último.

- El carbón de piedra finamente molido es inyectado a gran velocidad con un chorro de aire caliente (aproximadamente. 1500°C) en un horno en las estaciones de generación de electricidad. El contenido carbónico se quema instantáneamente, y la materia restante (que comprende sílice, alúmina y oxido de hierro) se funde en suspensión, formando finas partículas esféricas por el rápido enfriamiento mientras son llevados por los gases de combustión.
- En la producción de OPC, la piedra caliza y la arcilla, finamente molidas y mezcladas, son alimentadas en un horno giratorio inclinado, en el cual se forma clinker a 1400°C. El clinker enfriado se muele finamente y se mezcla con yeso para producir OPC.
- Dependiendo del tipo de carbón de piedra, la pfa contiene diversas proporciones de cal, la pfa de poca cal es puzolánica y la pfa con mucha cal tiene propiedades cementosas en si mismas. Igual que en otras puzolanas, la cal liberada por la hidratación del OPC se combina con la pfa para actuar como un material cementoso.
- Las partículas esféricas, huecas, vidriosas de pfa tienen la misma finura que el OPC, por lo que no es necesaria una mayor molido. La adición de pfa genera un concreto fresco más trabajable (probablemente debido al efecto de cojinete de bolas de las partículas esféricas) y homogéneo (dispersando el cemento y distribuyendo uniformemente el agua).

Otras ventajas de emplear la pfa son:

- Con el incremento del tiempo, se desarrollan mayores resistencias que el concreto sin pfa.
- La pfa no influye negativamente el comportamiento estructural de las piezas de concreto.
- Comparada con el concreto de OPC, el concreto de pfa es más liviano, menos permeable (debido a su compactación más densa) y con un mejor acabado

- El concreto de pfa es además más resistente al ataque del sulfato y a la reacción sílice-álcali.
- Los concretos en los cuales se reemplaza entre 35 a 50% del peso de OPC por pfa han mostrado comportamientos satisfactorios.
- Los áridos derivados de la ceniza volátil muestran una excelente adhesión en concretos de pfa, contribuyendo favorablemente a su comportamiento y durabilidad.

Las cenizas volantes que son producto de la combustión del carbón en las usinas termoeléctricas, donde son recogidas a través de electro filtros. Se dividen en dos categorías, según la Norma ASTM C-618:

**Clase F:** son cenizas volantes con menos del 10% de óxido de calcio, resultantes de la combustión de la antracita y carbón bituminoso. Presentan un alto contenido de aluminosilicatos amorfos y en menor proporción aluminosilicatos cristalinos, cuarzo, magnetita, hematita y hasta un 10 % de carbón sin quemar. Presentan solo actividad puzolánica.

**Clase C:** de alto contenido de óxido de calcio (entre 15 y 35%), resultantes de la combustión del lignito y carbón sub bituminoso. Presentan elevados contenidos de aluminosilicatos amorfos y pequeñas cantidades de minerales cristalinos como aluminatos tricálcicos y sulfatos alcalinos con menos de un 1% de carbón sin quemar. Un elevado porcentaje de los minerales cristalinos presentes resulta reactivo y le confiere a la ceniza propiedades cementicias, las que se suman a la actividad puzolánica.

En territorio boliviano no existe prácticamente producción de cenizas volantes, ya que no existen las usinas térmicas por no haber plantas de este tipo.

### **ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA MOLIDA**

- La escoria de alto horno es un material fundido que se asienta sobre el lingote de arrabio en la parte inferior del horno. Esta es producida por los diversos componentes en el horno cuando se llega a los 1400° a 1600°C.

- Un enfriamiento lento de la escoria genera un material cristalino, empleado con árido. Un rápido enfriamiento con aire o agua bajo presión forma pelotillas vidriosas (escoria expandida > 4 mm., adecuado con árido ligero) y gránulos menores de 4 mm., que poseen propiedades hidráulicas cuando se muelen finamente.
- La escoria triturada se mezcla con OPC para producir cemento portland, de alto horno (PBFC), en el que el contenido de escoria puede llegar al 80%. Sin embargo, ya que el PBFC es más lento para reaccionar que el OPC, la reactividad se reduce a mayor porcentaje de escoria.
- Aunque la resistencia temprana de los concretos de PBFC generalmente es menor que de los concretos de OPC, es probable que la resistencia final sea mayor. La más lenta reactividad del PBFC genera menos calor y puede ser ventajoso en donde el agrietamiento térmico es un problema.
- Además de hacer más trabajable el concreto fresco, el PBFC tiene gran resistencia al ataque químico y su capacidad de proteger el refuerzo de acero la hace adecuada para emplear en concretos reforzados y pretensado.

### **CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ**

- La combustión de los residuos agrícolas elimina la materia orgánica y, en la mayoría de los casos, produce una ceniza rica en sílice. De los residuos agrícolas comunes, las cáscaras de arroz producen la ceniza de mayor cantidad (también llamado horno Paddy) - alrededor del 20% del peso - que también tiene el mayor contenido de sílice - alrededor del 93% del peso. Es su gran contenido de sílice lo que le da a la ceniza sus propiedades puzolánicas.
- Sin embargo, sólo la sílice amorfa (no cristalino) posee estas propiedades, es por esta razón que la temperatura y duración de la combustión son importantes en la producción de la ceniza de cáscara de arroz (RHA). La sílice amorfa se obtiene quemando la ceniza a una temperatura menor de 700°C. Una combustión sin control de las cáscaras de arroz, ej.: cuando son usadas como combustible o quemada en un

montón, generalmente a temperaturas mayores de 800°C, genera la cristalización de la sílice, que es menos reactiva.

- La ceniza reactiva es de gris oscura a blanca, dependiendo del carbón residual en ella, que no tiene efecto negativo si es menor de 10%. Para mejorar su reactividad, la ceniza es pulverizada en un molino de bolas por aproximadamente una hora, o más si contiene sílice cristalina. La ceniza puede reemplazar hasta 30% del cemento de un mortero o concreto. Alternativamente, puede ser mezclada con 30 a 50% de cal hidratada para ser empleada como cemento en morteros, enlucidos y concreto en masa.
- En otro proceso, la ceniza obtenida del quemado del montón o la de producción del arroz pre cocido se mezcla con 20 a 50% (del peso) de cal hidratada. Esta es triturada durante seis o más horas en un molino de bolas para producir ASHMOH, un aglomerante hidráulico adecuado para obras de mampostería, cimientos y obras de concreto en general diferentes al concreto armado. Una variación de éste es el ASHMENT, en el cual se sustituye la cal por cemento portland.
- También se ha desarrollado un método que emplea lodo de cal, residual obtenido de la refinación de azúcar. Este es secado y mezclado con una cantidad igual (de peso) de cáscara de arroz triturada y algo de agua. Se hacen trozos a mano del tamaño de pelotas de tenis y se secan bajo el sol. Estos son quemados sobre una parrilla en un horno abierto, para producir un polvo blando, que se muele en un molino de bolas. El aglomerante hidráulico es empleado de la misma manera que el ASHMOH.
- Una variante de este método utiliza suelo con un contenido mínimo de arcilla de 20% en lugar de lodo de cal. El aglomerante resultante puede emplearse como una mezcla de 30% con cemento portland, para hacer cemento portland, puzolánico. Las pruebas han mostrado que la puzolana es mejor si la arcilla es bauxítica.
- En el National Building Research Institute, Karachi, Pakistan: La primera casa de bajo costo para ser construida con cal y ceniza de cascara de arroz, reemplazando completamente el cemento en la producción de bloques aligerados resistente a la

carga, mortero y enlucido. El 30% del cemento portland, de los dinteles de concreto prefabricados y de las viguetas de techo fue reemplazado por RHA.

### **CENIZAS DE CAÑA DE AZÚCAR**

Obtenidas durante la producción del azúcar de caña, quemadas a temperaturas de 800° a 1000°.

### **SÍLICE CONDENSADA**

Partículas esféricas de elevada área superficial y tamaño menor a una micra, generadas por la condensación de vapores en la producción de carburo de silicio.

### **SÍLICE GEOTÉRMICA**

Partículas de tamaño submicrónico, de elevada área superficial, producidas como incrustaciones en líneas de vapor geotermal en plantas de generación de electricidad.

### **ARCILLAS TERMO-ACTIVADAS**

Con temperaturas entre 600° y 1000° se produce la descomposición del mineral arcilloso en sílico-aluminatos de estructura amorfa.

## **1.3.4 CLASIFICACIÓN DE PUZOLANA EN BASE A SUS CARACTERÍSTICAS:**

### **1.3.4.1 ORIGEN**

Es necesario iniciar este apartado con una clasificación de materiales volcanoclásticos para circunscribir al suelo objeto de este estudio.

Se clasifica tres tipos de sedimentos dentro de la actividad eruptiva de un volcán, a saber: autoclásticos, piroclásticos y epiclásticos.

De acuerdo a lo anterior, se define a estos materiales de la siguiente manera:

- Las rocas autoclásticas son aquellos materiales de lava que se han formado dentro de las aberturas volcánicas, durante el movimiento del flujo o por explosiones de gas dentro de las lavas que han dejado de fluir.

- Las rocas piroclásticas contienen fragmentos producidos por explosiones volcánicas y lanzadas hacia el exterior desde las aberturas volcánicas, en partículas separadas.
- Las rocas epiclásticas contienen fragmentos producidos por la meteorización y erosión por el solidificado o litificado de cualquier tipo de roca volcánica.

Se atiende a dos aspectos para su clasificación: el primero es el tamaño de las partículas y el segundo al origen primario de los fragmentos; también acepta que una simple clasificación funcional que incorpore todos los factores involucrados en el desarrollo de las rocas volcánicas es prácticamente imposible, por esta razón su clasificación la basa en los dos aspectos antes mencionados.

Como el suelo a ser estudiado se enmarca en los sedimentos volcanoclásticos lanzados hacia afuera del edificio volcánico, después son transportados por el aire y por último depositados, ya depositados entran en proceso de meteorización por los cambios de temperaturas y a la presencia de agua (presencia de lluvias intensas a moderadas) con sales. Bajo este proceso se presenta la tabla 1.2 en donde se muestra los fragmentos de tipo piroclásticos y epiclásticos atendiendo, de acuerdo a Fisher (1961), al tamaño y origen primario.

Tamaño de partícula (mm)	Material volcanoclástico		
	Fragmentos epiclásticos	Fragmentos piroclásticos	
> 256	Bolo o canto rodado	Grueso	Bloques
256 a 64	Canto rodado	Fino	Y bombas
64 a 2	Guijarro	Lapilli	
2 a 1/16	Arena	Gruesa	Cenizas
1/16 a 1/256	Limo	Fina	
< 1/256	arcilla		

Tabla N° 1.2: Límites de tamaños de partículas para fragmentos epiclásticos y piroclásticos

#### 1.3.4.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Si colocamos en un diagrama triangular los diversos materiales que se utilizan en la práctica (Figura 1.4.) se puede apreciar que la cal grasa ocupa el vértice CaO, las puzolanas y cenizas volantes, están sobre la línea SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en el primer tercio, partiendo de SiO<sub>2</sub>. La recta que atraviesa el área de las puzolanas hasta el polo CaO, cruza una zona común para las escorias de alto horno, los clinker del cemento portland, las cales hidráulicas, las magras para terminar en el polo mismo representativo de las cales grasas.

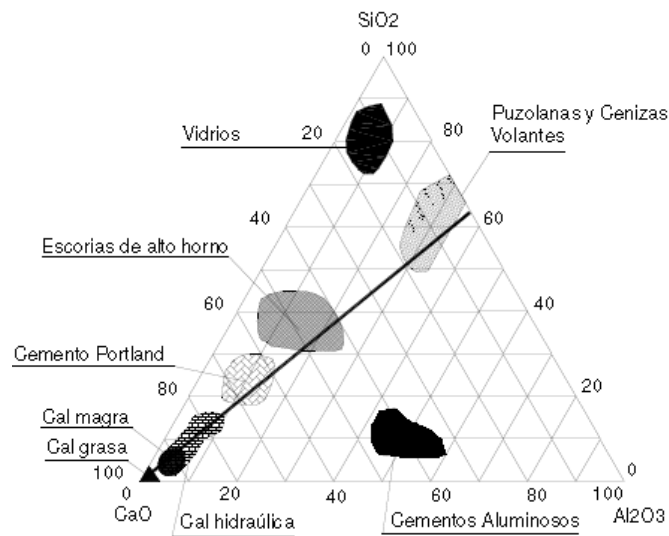


Figura 1.4: Diagrama de materiales puzolánicos (Deloye, 1993)

### 1.3.5 PROPIEDADES DE LA PUZOLANA

Las propiedades de las puzolanas dependen de la composición química y la estructura interna. Se prefiere puzolanas con composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sea mayor del 70%. Se trata que la puzolana tenga una estructura amorfa.

En el caso de las puzolanas obtenidas como desechos de la agricultura (cenizas de la caña de azúcar y el arroz), la forma más viable de mejorar sus propiedades es realizar una quema controlada en incineradores rústicos, donde se controla la temperatura de combustión, y el tiempo de residencia del material.

### 1.3.6 USOS DEL MATERIAL PUZOLÁNICO

## **MEJORA EN LAS PROPIEDADES DEL CEMENTO PUZOLÁNICO**

El cemento puzolánico se produce a partir de mezclar íntimamente y moler en un molino de bolas hasta fino polvo una mezcla de hidrato de cal y puzolana, con una proporción promedio de 70% de puzolana y 30% de cal. El material producido requiere tener una finura similar a la del cemento Pórtland ordinario (250-300 m<sup>2</sup>/kg ensayo Blaine). El cemento puzolánico tipo CP40 ha sido desarrollado y producido por el CIDEM, centro de investigaciones de la Universidad Central de Las Villas, Cuba.

Las ventajas que ofrece el cemento puzolánico sobre el resto se detallan a continuación:

- Mayor durabilidad del cemento.
- Mejora en la resistencia frente al agua de mar.
- Mejor defensa ante los sulfatos y cloruros.
- Aumento en la resistencia a la compresión.
- Incremento de la impermeabilidad por la reducción de grietas en el fraguado.
- Disminución del calor de Hidratación.
- Mejora en la resistencia a la Abrasión.
- Aumento la resistencia del acero a la corrosión.
- Menor necesidad de agua.

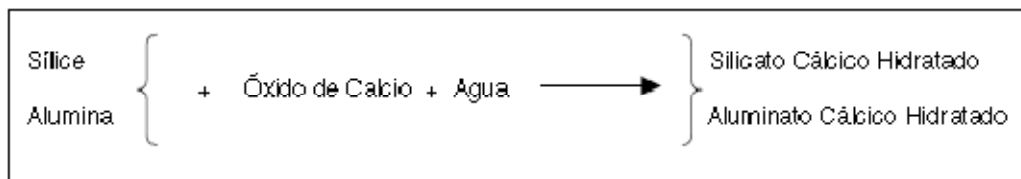
## **OTROS USOS DE LA PUZOLANA**

- Filtro natural de líquidos por su elevada porosidad.
- Sustrato inerte y aireante para cultivos hidropónicos.
- Fabricación de Hormigones de baja densidad (como ya se ha señalado en el caso del Panteón de Roma).
- Drenaje natural en campos de fútbol e instalaciones deportivas.

- Absorbente (en el caso del agua del 20 al 30 % del peso de árido seco) y preparación de tierras volcánicas olorosas.
- Aislante Térmico (0,21 Kcal / Hm<sup>2</sup> C)
- Arqueología. Protector de restos arqueológicos de baja densidad para conservación de restos (por construcción sobre ellos o con carácter temporal).

### 1.3.7 LA REACCIÓN PUZOLÁNICA

La reacción puzolánica consiste en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina, amorfos o débilmente cristalizados en un medio altamente alcalino como el creado por una solución de hidróxido de calcio, generándose aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento portland. Es decir que es un proceso natural de formación de cemento. Esta reacción es irreversible y puede escribirse esquemáticamente del siguiente modo:



### 1.4 ESTABILIZACIÓN

Se conoce como estabilización, al conjunto de procesos físicos, químicos, y físico-químicos tendientes a modificar las propiedades de los suelos que interesan para un determinado uso en ingeniería, haciendo que el material “suelo” sea adecuado para la utilización prevista reemplazando a otros materiales no DISPONIBLES o MÁS COSTOSOS.

La estabilización de suelos tiene por objeto procurar por diversos medios la estabilidad de ellos, para cualquier condición de tiempo y de servicio, entendiendo por estabilidad la permanencia en el tiempo de las características mecánicas obtenidas al momento de la construcción.

Estos medios o procesos van desde la incorporación a los suelos de materiales o nuevos elementos que proporcionen estabilidad, hasta la formación de verdaderos mecanismos de defensa contra la acción de las fuerzas climáticas.

La estabilización significa entonces, no solo llegar a un estado del suelo con suficiente resistencia a la acción destructora y deformante de las cargas, sino también asegurar la permanencia de ese estado a través del tiempo. Este último aspecto del proceso tiene fundamental importancia, ya que de su existencia, depende la existencia del primero.

Para la selección y aplicación de la técnica de estabilización, se debe tener en cuenta ciertas características de los suelos, las cuales se mencionan a continuación:

- Estabilidad Volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad
- Durabilidad

### **ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA**

Problemas relacionados con los suelos expansivos por cambios de humedad.

Se trata de transformar la masa expansiva en una masa rígida, con lazos fuertes de unión para resistir las presiones de expansión, esto se logra con tratamientos químicos o térmicos.

### **RESISTENCIA**

En pos de mejorar este parámetro en los suelos son muy utilizados los métodos mecánicos y los químicos especialmente con cemento, cal o aditivos.

Es muy importante el contenido de materia orgánica, ya que estos no permiten una buena estabilización de las subrasantes.

**PERMEABILIDAD**

Es un parámetro modificable mediante métodos como la compactación y las inyecciones principalmente, y generalmente las reducciones de éste parámetro no van ligados con la variación de la estabilidad volumétrica o la resistencia.

**COMPRESIBILIDAD**

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos.

**DURABILIDAD**

Se refiere a la resistencia al intemperismo, a la erosión, o a la abrasión del tráfico; de esta manera se asocia generalmente a problemas situados cercanos a la superficie de rodamiento.

Condiciones agentes estabilizantes:

1. Productos disponibles en cantidades con calidad constante y normalizada
2. Buena durabilidad en condiciones de trabajo
3. Facilidad de almacenamiento y transporte
4. Técnica constructiva adecuada

**GRANULARES:**

1. Impermeabilidad
2. Cohesión

**COHESIVOS:**

1. Reducir cambios de volumen
2. Caída de resistencia bajo cargas

**LOS CAMBIOS QUÍMICOS DETERMINAN:**

La unión entre partículas resistente a la acción del agua.

Matriz o estructura interna rígida o semirrígida que determina su comportamiento ante las cargas.

Poros llenos de agua o aire, el hinchamiento está limitado por la resistencia de la matriz a los esfuerzos internos.

**LOS CAMBIOS FÍSICOS DETERMINAN:**

Bajo contenido de agua y mejor comportamiento mecánico a la acción de las cargas

**LOS CAMBIOS FISICOQUÍMICOS DETERMINAN UN INTERCAMBIO CON LOS CATIONES NATURALES DE LA FRACCIÓN ARCILLOSA QUE:**

1. Modifica profundamente su plasticidad
2. Retención de agua
3. Cambios de volumen
4. Adherencia

**1.4.1 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN**

1. *Estabilización mecánica* que comprende el manipuleo y compactación de los suelos para obtener su densificación.
2. *Estabilización física* que persigue la obtención de una adecuada granulometría, mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o ambos a la vez, al primitivo suelo.
3. *Estabilización físico-química*, que se refiere al cambio de las propiedades del suelo por efectos físico -químicos de superficie mediante la adición de cementos orgánicos e inorgánicos y materiales impermeabilizantes.

Todo método práctico de estabilización de suelos, puede involucrar uno, dos o todos los principios que se han expuesto.

En la terminología caminera, suelen utilizarse las siguientes denominaciones, entre otras, para designar distintos tipos de estabilizaciones:

- a. Compactación especial.
- b. Estabilización granulométrica.
- c. Suelo-Cal
- d. Suelo-Cemento.
- e. Suelo-Betún.
- f. Estabilización con agentes químicos.

## **1.4.2 ESTABILIZACIÓN CON CAL**

### **1.4.2.1 INTRODUCCIÓN**

El uso de Cal y materiales puzolánicos para fines de estabilización y formación de materiales cementicios inicia con el comienzo de nuestra historia.

Hace más de 5000 años se construyeron las pirámides de Shensi en el Tíbet. China e India hicieron fundaciones masivas de puentes y cámaras subterráneas, de arte puramente experimental ha venido pasando a ser toda una ciencia

1. Física
2. Química
3. Físico-química
4. Mineralogía
5. Geología

Aceptar el material como está, tomando realistamente su calidad en el diseño efectuado.

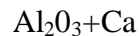
Eliminar el material insatisfactorio, sustituyéndolo por otro de características adecuadas.

Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos.

#### 1.4.2.2 PROCESO DE ACCIÓN DE LA CAL EN UN SUELO

Se distinguen cuatro procesos en el accionamiento de la cal en los suelos:

1. Intercambio de bases: los suelos plásticos ( $IP > 10$ ) poseen cationes  $Na^{++}$ ,  $K^{+}$  o  $Mg^{++}$  que poseen gran poder de atracción de agua debido a una descompensación de cargas superficiales al incorporar cal a el suelo incorporamos iones  $Ca^{++}$  que remueven a los iones  $K^{++}$ ,  $Na^{++}$  o  $Mg^{++}$  compensando cargas superficiales y disminuyendo el poder de atracción del agua proceso que se denomina intercambio de bases.
2. Floculación: es la agregación de las partículas de arcilla que hace posible el desplazamiento de la curva granulométrica del suelo hacia la zona gruesa ello es debido a una atracción de las partículas entre sí que se hace posible debido a la eliminación de agua adsorbida, entonces las partículas se agrupan. Este proceso requiere horas para producirse y el porcentaje de cal necesario será de 2% en peso, depende del tipo de suelo.
3. Acción Puzolánicas: es una reacción química que se produce entre los minerales componentes de la arcilla y la cal. El proceso se produce más lentamente por combinación del:



Dando lugar a los silicatos y aluminatos cálcicos que poseen gran poder cementante. El principal elemento que se combina es el  $SiO_2$ .

El endurecimiento es lento, favorecido por la temperatura, viéndose favorecida la reacción cuando se encuentran en un medio de pH 10,5 a 11 es decir alcalino.

Por ello (del intercambio de bases y la floculación), el primer 2% mejora el pH y el resto de cal favorece el proceso de acción Puzolánicas.

4. *Carbonatación*: es una reacción química que se produce entre el óxido de calcio puro (CaO) cal y el dióxido de carbono de la atmósfera.

Se supone que este fenómeno posee más probabilidad de desarrollarse cuando hay excesos de cal y cuando hay contacto con el oxígeno del medio ambiente. Es por ello que tiene lugar en las capas superficiales generando una heterogeneidad con el material ligante.

Para evitar estos problemas debe restringirse el contacto con el oxígeno de la atmósfera de la capa suelo cal durante el proceso de maduración dando lugar a lo llamamos curado, el que se materializa mediante riego asfáltico.

De lo precedentemente expuesto se deduce que existen dos procesos bien diferenciados en la elaboración de suelo estabilizado con cal.

- |    |   |   |
|----|---|---|
| I  | { | <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Intercambio de bases.</li> <li>b. Floculación.</li> </ul> |
| II | { | <ul style="list-style-type: none"> <li>c. Acción Puzolánicas.</li> <li>d. Carbonatación.</li> </ul> |

En el proceso I hay una modificación del suelo en el cual se cambian las propiedades del mismo siendo tales modificaciones *irreversibles*.

En el segundo proceso tiene lugar la acción de cimentación del material y ganancia de propiedades de resistencia al corte por aumento de cohesión.

De lo expuesto puede decirse que hay dos formas de accionar sobre un suelo mediante cal.

1. Modificar el suelo con cal.
2. Estabilizar el suelo con cal.

El término "cal" comprende al óxido de calcio (cal viva) y al hidróxido de calcio (cal hidratada).

En ambos casos puede estar acompañada con pequeñas cantidades de óxido o hidróxido de magnesio. La cal se obtiene por calcinación de rocas calcáreas adecuadas, con o sin hidratación posterior. Cuando la roca contiene compuestos arcillosos, parte de la cal se combina con los óxidos de hierro y aluminio ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dando origen a cales denominadas hidráulicas.

Como podemos ver el agregado paulatino de cal al suelo produce un aumento del límite plástico, proceso favorecido por el intercambio de bases, la menor afinidad del suelo tratado hacia el agua implica una mayor adición de agua lograr que el suelo pase de un sólido rígido a un material de tipo plástico. De la misma manera el límite líquido disminuye debido a que las partículas estabilizadas requieren de menor humedad para perder su estructura plástica y tornarse en un fluido. Si la cal no hubiese actuado, el agua agregada se alojaría en la estructura arcillosa y evitando la licuación.

### **1.4.3 PUZOLANA COMO ADITIVO PARA SU USO EN LA ESTABILIZACIÓN**

Es un conglomerante Puzolánicas, que para su fraguado necesita la presencia de agua y la de un activante del proceso, hidróxido de calcio (cal).

La ceniza volcánica representa una alternativa muy interesante como aditivo en la construcción de diversas capas del firme, pero su empleo solo es viable en las proximidades de los centros donde se encuentran depositados.

Se describe con más detalle en el siguiente capítulo.

### **1.4.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON LA ADICIÓN PUZOLANA-CAL ELABORACIÓN DE CEMENTOS A PARTIR DE PUZOLANAS**

De acuerdo a los cementos hasta ahora elaborados en el laboratorio y en las experiencias de campo, difícilmente se puede producir un solo cemento de

mampostería que pueda utilizarse para elaborar morteros de unión, para estabilización de suelos y otros, pues técnicamente se caería en la misma ineficiencia que cuando se usa el Cemento Portland, indiscriminadamente.

Los resultados sugieren la elaboración de cementos compuestos de Puzolana, Cemento Portland e Hidróxido de Calcio para morteros de levantado y fabricación de bloques, mientras que para revestimientos y estabilización de suelos es conveniente un cemento compuesto de Hidróxido de Calcio y Puzolana. Las dosis dependerán de los requerimientos de uso.

### **ESTABILIZACIÓN DE SUELOS A PARTIR DE PUZOLANAS (SUELO-PUZOLANA-CAL)**

La cal por sí misma puede reaccionar con suelos que contienen tan poca arcilla como 7% e Índices de Plasticidad tan bajos como 10. Si el suelo no es suficientemente reactivo, la cal puede ser combinada con una fuente adicional de sílice y alúmina. Tales puzolanas incluyen la ceniza volante, ceniza volcánica y la escoria de alto horno. La sílice y alúmina adicional de las puzolanas reaccionan con la cal para formar la fuerte matriz cementante que caracteriza a una capa estabilizada con cal. Las mezclas correctamente proporcionadas de cal y puzolanas pueden modificar o estabilizar casi cualquier suelo, pero comúnmente se usan para suelos con plasticidad de baja a media.

La ceniza volante es la puzolana más comúnmente usada..

El empleo de ceniza o polvo de horno de cal (LKD por sus siglas en inglés) es una alternativa cada vez más popular. El LKD es el residuo fino que resulta de la combustión de carbón y el tratamiento de caliza en un horno, para procesar la piedra en cal y que es removido de los gases de escape del horno. El LKD por lo general contiene una cantidad significativa de cal, aluminio y silicio -es en esencia una premezcla de puzolana y cal-. La cantidad de cal, silicio y aluminio en el LKD varía, principalmente dependiendo de la caliza, el combustible y el tipo de operaciones del horno usadas durante el proceso de fabricación de cal.

## **2.1. EXPLORACIÓN Y MUESTREO**

### **2.1.1. UBICACIÓN DE LA ZONA**

El área de estudio se circunscribe a la porción de la zona urbana de la ciudad de Tarija, como lo es la zona norte, en uno de los muchos barrios que tienen el tipo de material arcilloso, tal es el caso del barrio “Panamericano” Nueva avenida integración.

### **2.1.2. REALIZACIÓN DEL MUESTREO**

Para la selección de la muestra, se tuvo en cuenta que fuera del tipo arcilloso y presentara comportamiento plástico y expansivo.

#### **SITIO DE EXTRACCIÓN DE ARCILLA**

Caracterizada por la presencia en abundancia de arcilla.

#### **UBICACIÓN:**

El lugar de extracción se encuentra en el barrio “Panamericano” teniendo en sus alrededores al barrio “Los Chapacos” en la Nueva Avenida Integración (Foto satelital de la ubicación del lugar de extracción del material Arcilla).

#### **SITIO DE EXTRACCIÓN DE LA PUZOLANA**

Caracterizada por la presencia de arcilla en el estrato inferior y en la parte superior por capas bastante considerables aproximadamente 3m y/o mas de altura, con la presencia de puzolana de coloración blanquecina.

#### **UBICACIÓN DE MUESTREO DE LA PUZOLANA:**

El lugar de extracción se encuentra en la zona sur de la ciudad de Tarija aproximadamente a 500m antes de llegar a la localidad de la “Pintada”, obteniendo también en el barrio Miraflores.



Foto satelital de la ubicación del lugar de extracción del material Arcilla



Aspecto del material arcilloso del lugar del muestreo.

Fotografía N° 2.1: Extracción de arcilla



Fotografía N° 2.2: Lugar de extracción de la puzolana (Pintada)

## **2.2. PREPARACIÓN Y ENSAYOS DEL MATERIAL**

### **2.2.1. ENSAYO DEL MATERIAL A ESTABILIZAR**

#### **2.2.1.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Los análisis granulométricos (NLT-104) se realizaron mediante tamizado por vía seca Norma AASHTO-T88 en las fracciones superiores a 75 micras (Serie Normalizada de Tamices ASTM N° 4, 10 y 40) y por lavado sobre el tamiz 200 de acuerdo a la Norma AASHTO-T88.

Sobre materiales considerados representativos (tabla 2.3)

<b>TAMIZ</b>	<b>%QUE PASA</b>
<b>N° 40</b>	99,36
<b>N° 200</b>	94,36

Tabla N° 2.3: Resultados correspondientes a la arcilla

Está formado por materiales con características propias de las arcillas, con una fracción inferior a 75 micras de 94%

### 2.2.1.2. LÍMITES DE ATTERBERG

La determinación del Límite Líquido (NLT-105) , y del Límite Plástico(NLT-106) se efectuó sobre todas las muestras consideradas representativas.

Se determinaron los límites líquido y plástico de los materiales, encontrándose que los valores correspondientes a las arcillas que son homogéneos y de baja plasticidad (tabla N° 2.4)

<b>L.L. (%) =</b>	58,55
<b>L.P. (%) =</b>	45,12
<b>I. P. (%) =</b>	13,43

Tabla N° 2.4: Resultados correspondientes a la plasticidad de la muestra

### 2.2.1.3. COMPACTACIÓN

Antes de iniciar el proceso de compactación, se realizan determinaciones de la humedad de elaboración mediante pequeñas porciones representativas del material a ser compactado.

Las muestras de suelo a ser ensayadas en las pruebas para determinar la densidad máxima se elaborarán mediante compactación.

El suelo, se deposita en el molde de compactación en tres capas; cada una golpeada mediante 56 golpes. El molde es un cilindro de 4" de diámetro.

Inmediatamente después del acomodo del suelo en el molde, se compacta la muestra a la velocidad y carga máxima especificada. Luego de alcanzar la carga máxima, se enrasa el espécimen cuidadosamente una regla metálica hasta dejar el nivel del suelo al ras del borde superior del molde.

Se realizan de varias determinaciones con diferente grado de humedad, construyéndose la **curva humedad-densidad seca** estudiada en este apartado (Figura N° 2.1).

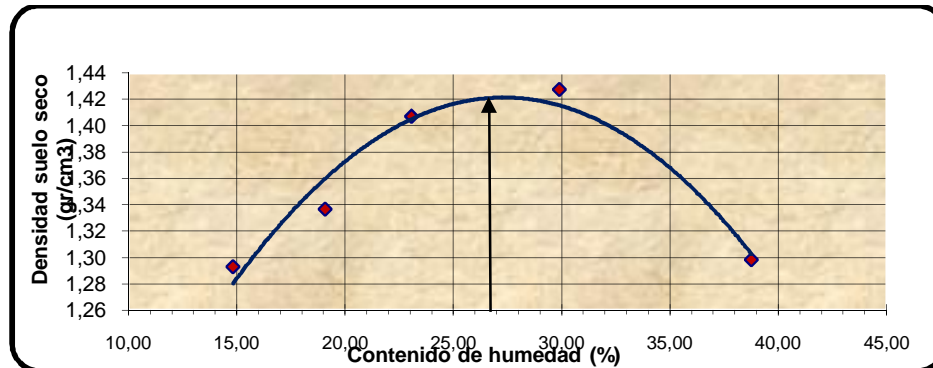


Figura N° 2.1: Resultados correspondientes a la compactación de la muestra donde se observa los valores de densidad máxima y humedad óptima típicos de una arcilla.

#### 2.2.1.4 ENSAYO DE VALOR SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

A fin de conocer el valor soporte de la muestra arcillosa se llevaron a cabo ensayos CBR sobre mezclas de suelos. Las mezclas fueron compactadas y de humedad controlada. El material fue desmoldado, desmenuzado y pasado por el tamiz 4, realizándose el ensayo CBR.

Siendo uno de los objetivos de esta investigación la ejecución de ensayos sencillos, que puedan ser realizados en todos los laboratorios de suelos, se experimentó sobre moldes CBR.

Con una muestra de suelo se obtuvo mediante compactación la Densidad Máxima y Humedad Óptima. Con esos valores se compactaron 3 moldes para realizar el ensayo CBR en diversas condiciones, utilizando en todos los casos pares de moldes de 6", compactados con la máxima energía (5 capas, 56 golpes; 5 capas, 25 golpes y 5 capas, 12 golpes por capa), pisón de 4,5 kg. y embebidos durante 4 días, previo a la penetración.

El **hinchamiento o expansión** se determina sometiendo la muestra a un proceso de inmersión durante 4 días, aplicando una sobrecarga equivalente a la previsible en

condiciones de uso de la carretera. Se efectuarán dos lecturas –una al inicio y otra al final del proceso empleando un trípode debidamente calibrado. El hinchamiento adquiere una especial importancia en suelos arcillosos o con alto contenido en finos, ya que puede provocar asientos diferenciales, origen de diversas patologías en todo tipo de construcciones.

Los valores obtenidos son al 100% y 95% de la densidad máxima (Tabla N° 2.5):

CBR SUELO PURO (%)	% EXPANSIÓN
100% = 3,37	4,32
95% = 2,37	4,32

Tabla N° 2.5: Resultados correspondientes al CBR y a la expansión de la muestra del suelo saturada durante 4 días.

Se observa que es un material expansivo y la resistencia de bajo valor soporte, es decir que necesita ser estabilizado, ya que según especificaciones la expansión debe ser menor al 4% y el CBR mínimamente mayor al 3%.

### 2.2.2. CLASIFICACIÓN

Sobre la base de los resultados del análisis granulométrico y límites de plasticidad de los suelos se realizó la clasificación de la muestra de acuerdo a dos de las clasificaciones más utilizadas en la mecánica de suelos (SUCS y AASHTO). Los resultados se muestran en la Tabla N° 2.6.

UNIFICADA SUCS	AASHTO
CH	A-7-6(15)

Tabla N° 2.6: Resultados de la clasificación de suelos de la muestra por los métodos del lavado.

Como puede apreciarse en ambas clasificaciones la arcilla se integra en una clase correspondiente:

Según SUCS “CH” Arcilla Inorgánica muy plasticidad, limos arcillosos color marron, ligeramente plástico y Según AASHTO A-7-6(15) son suelos muy elásticos y experimentan grandes cambios de volumen poseen límites líquidos elevados, de plasticidad relativamente variado en relación a sus límites líquidos, de un aspecto típico del material, coloración un tanto más oscura en café cuando se encuentra con presencia de agua.

### **2.3. PUZOLANA EMPLEADA COMO ESTABILIZANTE**

#### **2.3.1. ENSAYOS DE LABORATORIO DE LA PUZOLANA**

##### **2.3.1.1 ANÁLISIS QUÍMICO**

El ensayo se realizó por **VIA HUMEDA**, Primer paso se calcina la muestra y se lleva a la mufla (es un horno a mas de 1000°C) luego se deja enfriar. Segundo paso poner la mezcla en un vaso con su varilla para añadir ácido puro o ácido concentrado mover la muestra hasta que se vaya evaporando luego se agrega cloruro de amonio ( $\text{CINH}_4$ ), de ahí pasa al extractor de gases de lo cual se añade gotas de ácido nítrico luego se coloca agua destilada se verifica hasta que hierva. Tercer paso se lleva a un vaso y que tenga un papel filtro arriba como embudo se ase a la muestra y con agua destilada se empieza a quedar residuos todo lo que se queda en el papel filtrado se coloca en crisol y se lo lleva a la mufla y una vez calcinado el papel se lo lleva a la pesar el crisol de lo cual obtenemos el SILICE. Cuarto pasó lo que pasa del papel filtro y queda en el vaso se vuelve a llevar al extracto de gases, una vez hervida se coloca amoniaco hasta que cambie de color. Quinto paso se hace el mismo procedimiento que el Tercer paso vaso balón y todo lo que sobra en el papel filtro introducir la mufla del cual se determina el sesquióxido. Sexto paso lo obtenido en el vaso se coloca cloruro de bario para luego determinar el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) Séptimo paso lo que queda en el papel filtro es para obtener el óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pero el

mi caso lo realice por el equipo de T-WIN XRF y lo del balón de la cual se determina el óxido de magnesio (MgO) y el óxido de calcio (CaO)

Los resultados completos de los ensayos químicos se presentan en Anexos.

En resumen el análisis químico de la puzolana indica: alúmina, sílice, óxidos cálcicos, óxidos de hierro, óxidos alcalinos, óxidos de magnesio, bario, combinaciones de fósforo, etc.

SIMBOLOGÍA COMPUESTOS QUÍMICOS	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PUZOLANA (%)
SiO <sub>2</sub>	93,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,32
CaO	0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,22
MgO	0,39
SO <sub>3</sub>	0,16
PPF	4,92

Tabla N° 2.7: Resultados de una muestra de la puzolana en un laboratorio de química.

### 2.3.1.2. GRANULOMETRÍA

La existencia de una fracción pasante del tamiz 200 tan elevada llevó a la necesidad de conocer la composición granulométrica de la fracción fina. Tabla N° 3.6

Se realizó la separación de las fracciones granulométrica conforme a los límites de tamaño de partículas establecidos por ASTM. Como era de esperar en estos materiales existe una fracción limosa predominante, con cantidades variables de arena y arcilla.

TAMIZ	% QUE PASA
N° 200	86,44

Tabla N° 2.8: Resultados de la granulometría por el método del lavado de una muestra de la puzolana.

### 2.3.1.3. LÍMITES DE ATTERBERG

Los valores de plasticidad se analizaron sobre muestras consideradas representativas de las capas identificadas. La fracción arcillosa se encuentra escasamente representada, coincidiendo con la plasticidad nula y un porcentaje mínimo de límite líquido.

### 2.3.1.4. CLASIFICACIÓN

Se realizó la clasificación según los métodos más usuales ya conocidos, además de otro tipo de clasificación desde el punto de vista geológico para la demostración y verificación de la puzolana natural. Resultados se muestran en la Tabla N° 3.7.

UNIFICADA SUCS	AASHTO
ML	A-4(0)

Tabla N° 2.9: Clasificación de suelos correspondientes a la puzolana.

Desde el punto de vista de la geología se puede clasificar la muestra:

ML y A-4(0). Son limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca; arenas finas limosas o arcillosas no tengan nada de plasticidad, son limos poco elásticos de coloración blanquecina con partículas diminutas de color negro, con peso específico de 2,45. Desde el punto de vista geológico y por la composición química se tiene la clasificación según diagrama Deloye:

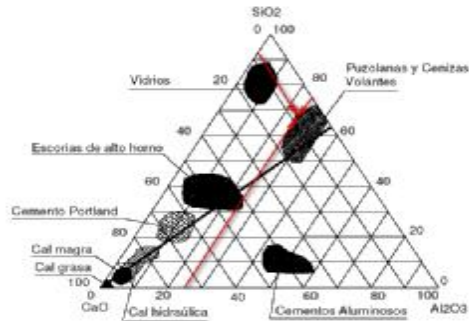


Figura N° 2.1: Clasificación según el Diagrama de materiales Puzolánicas

Según la clasificación mencionada (fig. N° 2.1) con anterioridad, en el diagrama de Deloye, se puede apreciar muy claramente por la intersección de las líneas, el área en donde llega a caer nuestro material y donde se puede clasificar la muestra como Puzolana en este caso natural.

-Según su origen volcánico se puede clasificar mediante la siguiente tabla:

Tamaño de partícula (mm)	Material volcanoclástico	
	Fragmentos epiclásticos	Fragmentos piroclásticos
> 256	Bolo o canto rodado	Grueso Bloques
256 a 64	Canto rodado	Fino Y hombas
64 a 2	Guijarro	Lapilli
2 a 1/16	Arena	Gruesa
1/16 a 1/256	Lien	Fina
< 1/256	arcilla	Cenizas

Tabla N° 2.10. Límites de tamaños de partículas para fragmentos epiclásticos y piroclásticos

“El concepto de la puzolana debe de estar basado sobre los procesos genéticos, descomposición de la roca madre, transportación de productos descompuestos por aguas calientes y evolución de depósitos debido a condiciones climáticas y vegetación”.

### **2.3.1.5. RECONOCIMIENTO VISUAL**

En nuestro medio lo podemos apreciar de la siguiente manera; debido a la manipulación que se lo puede a ser son iguales a los limos, de color blanquecino con partículas diminutas de color negro, en caso de que existiese la presencia de agua su color es de tipo marfil con una textura muy áspera, con presencia del agua se lo puede identificar que es un material no plástico, sin cohesión; que las partículas no se adhieren entre sí.

Según la norma ASTM C 618 el material se clasifica como puzolana natural, ceniza volcánica **clase N**

### **2.3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO DEL SUELO-PUZOLANA**

#### **2.3.2.1. LÍMITES DE ATTERBERG**

Para el porcentaje de mezcla de los materiales, se dio un solo porcentaje (3%) ya que no se cuenta con mucha información para realizar el análisis, y por tanto la verificación de cómo se comporta el suelo en interacción con la puzolana.

Para los límites se siguió los pasos descritos, pero se tuvo en cuenta que la muestra compuesta de los materiales sea mezclada cuidadosamente hasta que tenga un color uniforme de lo cual se obtuvo los siguientes datos. Resultados se muestran en la Tabla N° 2.11.

<b>L.L. (%) =</b>	52,63
<b>L.P. (%) =</b>	50
<b>I. P. (%) =</b>	2,63

Tabla N° 2.11: Resultados correspondientes a la plasticidad de la muestra

Como se puede ver en la tabla N° 2.9, el porcentaje de contenido de puzolana produce una disminución al Índice plástico.

### 2.3.2.2. COMPACTACIÓN

Se puede decir que la figura N° 2.1 muestra las modificaciones producidas por la aglomeración de partículas que hace aumentar la densidad máxima, respecto al del suelo puro. Además en la rama seca del ensayo de compactación, debe alcanzarse cierto grado de saturación para que el agua adquiera un rol lubricante.

La densidad máxima continúa decreciendo a medida que se incrementa el contenido de puzolana.

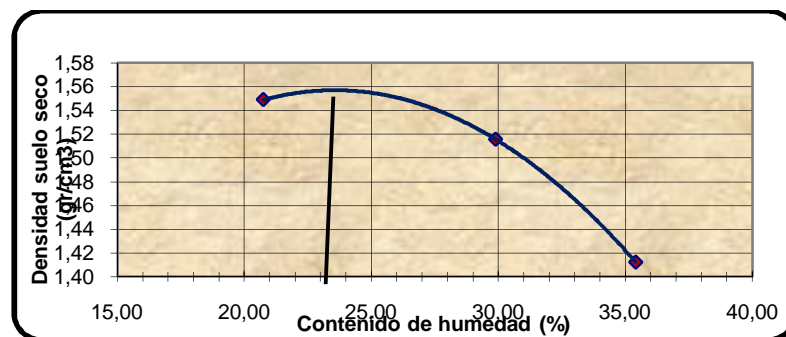


Figura N° 2.2: Gráfica de la influencia de la puzolana en la densidad máxima y la humedad óptima

### 2.3.2.3. ENSAYO DE VALOR SOPORTE CALIFORNIA (C. B. R.)

Para el CBR se debe tener en cuenta de hacer el mezclado cuidadosamente deshaciendo los grumos y hasta que la mezcla obtenga un color uniforme para su posterior empleo.

Los valores obtenidos son al 100% y 95% de la densidad máxima (Tabla N° 2.12):

CBR SUELO PURO (%)	% EXPANSIÓN
100% = 13,41	3,77

95% = 11,07	3,77
-------------	------

Tabla N° 2.12: Resultados correspondientes al CBR y a la expansión de la muestra del suelo saturada durante 4 días.

La humedad y el manipuleo de la muestra del mezclado del suelo-puzolana se ven en anexo.

Se observa en la tabla N° 2.12 que el CBR en presencia de la puzolana no tiene una modificación muy notoria, esto se debe a que no existe la acción Puzolánicas, ya que no se cuenta con la presencia de hidróxido de calcio en proporciones significativas.

## **2.4. ENSAYOS DE LABORATORIO DEL SUELO-CAL**

### **2.4.1. LÍMITES DE ATTERBERG**

Los límites de Atterberg han sido quizás los parámetros que más significativamente han manifestado la acción de la cal, produciendo resultados sorprendentes en las primeras investigaciones realizadas sobre el particular.

Como se sabe los Límites Líquido y Plástico reflejan los porcentajes de humedad mínimo y máximo, dentro de los cuales el suelo se encuentra en estado plástico siendo capaz de soportar deformaciones permanentes, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin agrietarse.

Estos límites han sido fijados en forma arbitraria intentando representar mediante ensayos los valores de humedad para los cuales el suelo pierde su resistencia al corte, pasando al estado líquido y no soporta más deformaciones plásticas, pasando al estado semisólido.

La cal en mayor proporción que la puzolana, reacciona y muestra un aumento en el índice plástico. Existe un método para determinar el contenido óptimo de cal, que toma como parámetro la abertura que existe entre el LL y el IP, para este método se toma en cuenta hasta donde crece bruscamente la abertura entre los dos parámetros.

Para este caso solo se está comparando entre los tipos de adición en un porcentaje de 3%. . Resultados se muestran en la Tabla N° 2.13.

<b>L.L. (%) =</b>	58,76
<b>L.P. (%) =</b>	50
<b>I. P. (%) =</b>	8,76

Tabla N° 2.13: Resultados correspondientes a la plasticidad de la muestra

Como se puede ver en la tabla N° 2.13, el porcentaje de contenido de cal produce un aumento al Índice plástico.

#### **2.4.2. COMPACTACIÓN**

La reacción entre el suelo y la cal, al igual que con la puzolana, causa una alteración de la relación Densidad Máxima – Humedad Óptima, que es dependiente del suelo, del tiempo de curado y de la cantidad de cal agregada.

Mientras mayor es el porcentaje de cal agregado al suelo, mayor es la Humedad Óptima del mismo y menor la Densidad Máxima. Este comportamiento de los suelos ha sido referido por diversos autores que coinciden en brindar como explicación del mismo, la floculación y formación de aglomeraciones de partículas con vínculos suficientemente fuertes como para actuar en conjunto soportando las cargas de compactación y generando un suelo más grueso que el inicial.

En los suelos arcillosos la cal produce una intensa floculación por el efecto del ión calcio sobre el espesor de la doble capa de las partículas de arcilla. El electrolito reprime la doble capa, reduciendo las fuerzas electrostáticas repulsivas entre las partículas de arcillas, lo cual conduce a una atracción entre caras cargadas negativamente y bordes de las partículas adyacentes con carga positiva. Se desarrolla de ese modo una estructura de “castillo de naipes”.

La arcilla floculada es aún sensible al agua y la remoción del electrolito llevaría a la inversión del proceso, es decir incremento del espesor de la doble capa, aumento de

las fuerzas repulsivas entre partículas, debilitamiento de los flóculos, reducción de su tamaño y con el tiempo defloculación de la mezcla.

### 2.4.3. ENSAYO DE VALOR SOPORTE CALIFORNIA (C. B. R.)

Muchos estudios acerca del tema nos indican que el comportamiento de una arcilla estabilizada con cal va adquiriendo una buena resistencia a corto plazo, de manera que se aumenta el porcentaje de cal.

El CBR aumenta en forma gradual hasta un (2-3%) luego tiene una tendencia a aumentar su capacidad soporte de manera brusca cerca al 5% donde generalmente adquiere su máximo valor.

A diferencia de la adición con puzolana se observa el gran crecimiento del CBR con relación a la mencionada anteriormente.

Los cambios también se manifiestan en la expansión con relación al porcentaje de cal adicionado.

Los valores obtenidos son al 100% y 95% de la densidad máxima (Tabla N° 2.14):

CBR SUELO PURO (%)	% EXPANSIÓN
100% = 40,78	1,13
95% = 28,46	1,13

Tabla N° 2.14: Resultados correspondientes al CBR y a la expansión de la muestra del suelo saturada durante 4 días.

### 3.1. HISTOGRAMAS COMPARATIVOS DE CAL Y PUZOLANA

En estos ensayos se comprobó en forma separada para verificar, cómo se comporta con el suelo con la cal, y el suelo con la puzolana.

#### GRÁFICAS DE COMPARACIONES DE ADICIÓN ENTRE CAL Y PUZOLANA AL 3%

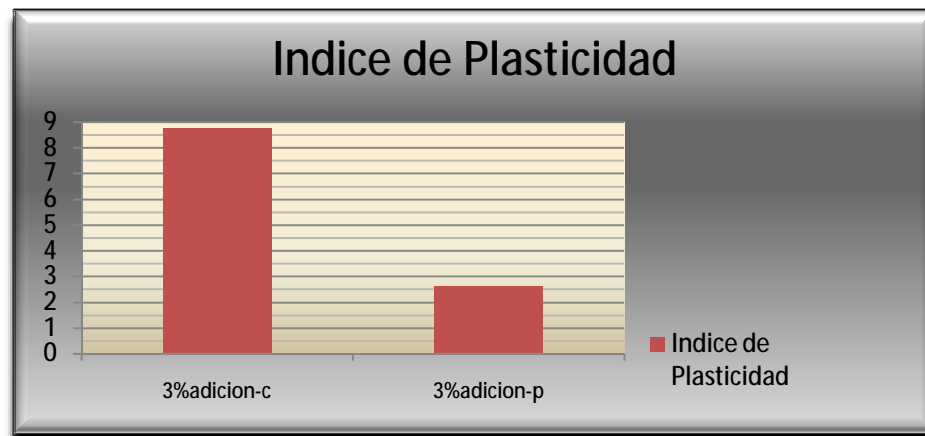


Figura N° 3.3: Gráficas comparativas de suelo-cal y suelo-puzolana den función al IP  
Se verifica que este ensayo la plasticidad con respecto con la puzolana es más bajo que con el de la cal debido a que la puzolana no tiene nada de cohesión y esto hace que la arcilla baje su plasticidad mucho más.

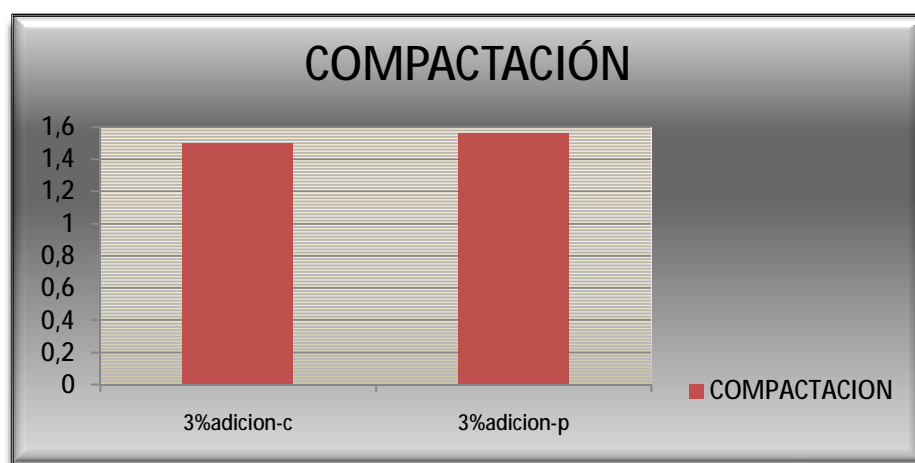


Figura N° 3.4: Gráficas comparativos de suelo-cal y suelo-puzolana de compactación

Se verificó que en la adición al 3 % con cal y puzolana la densidad máxima se encuentra casi similar siendo un poco más elevado con puzolana obteniendo un valor de  $1,56 \text{ gr/cm}^3$  y con cal  $1,5 \text{ gr/cm}^3$ .

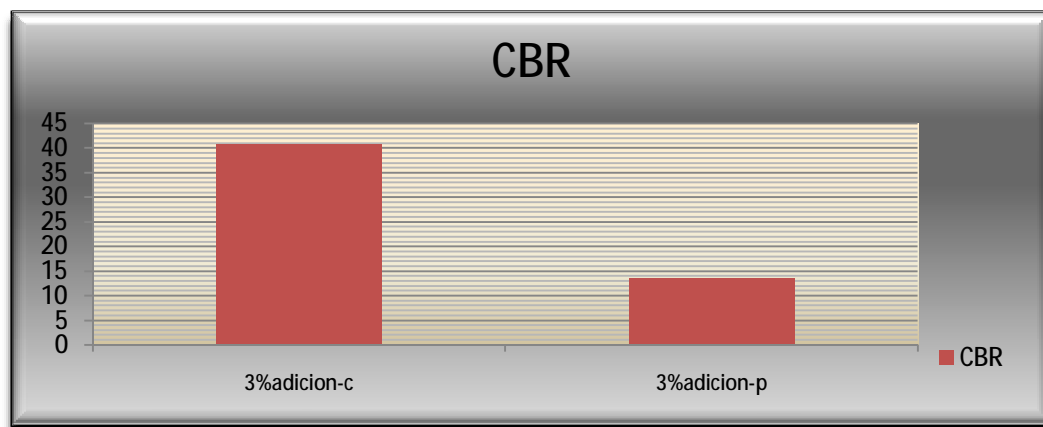


Figura N° 3.5: Gráficas Comparativas de suelo-cal y suelo-puzolana de CBR

Con respecto a la resistencia se verifica que adicionando cal a la arcilla su resistencia es de 43,01% y con respecto a la puzolana la resistencia es de 13,66 % esto quiere decir que comparando la cal con la puzolana en el porcentaje de 3 % con cal resiste mucho más que con puzolana.

### 3.2. HISTOGRAMAS COMPARATIVOS ENTRE EL SUELO PURO Y LA PUZOLANA

#### GRÁFICAS DE COMPARACIONES ENTRE LA ARCILLA Y PUZOLANA

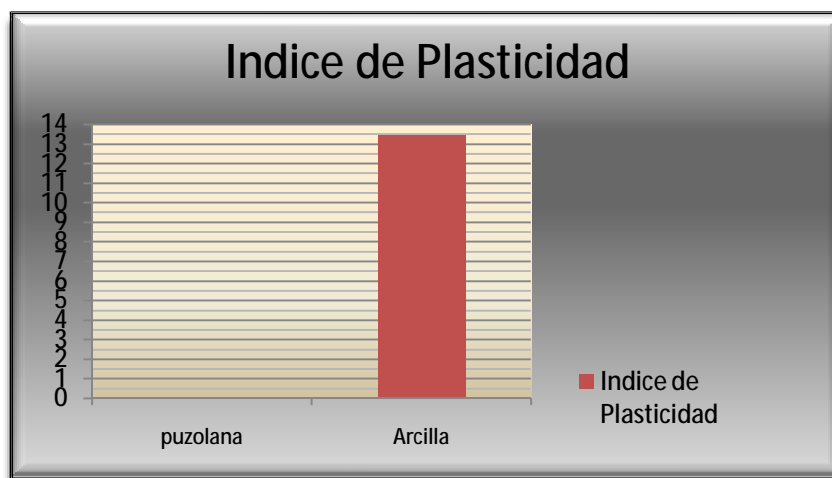


Figura N° 3.6: Gráficas comparativas de suelo y puzolana de IP

Se puede observar que la puzolana no tiene nada de cohesión de lo cual no tiene nada de plasticidad, sin embargo la arcilla es cohesiva y tiene un alto porcentaje de plasticidad,

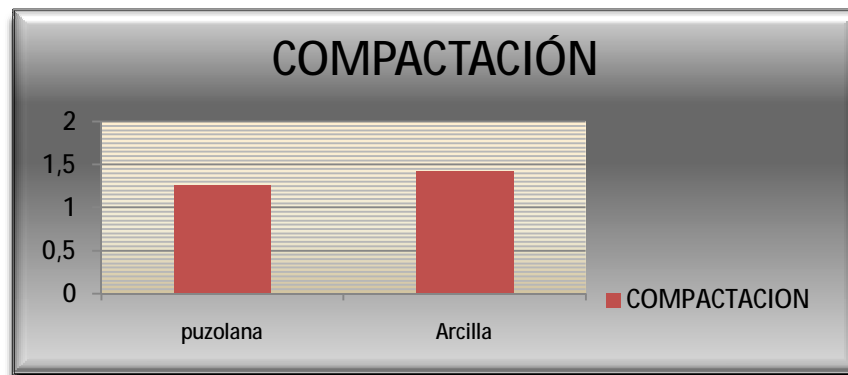


Figura N° 3.7: Gráficas comparativas de suelo y puzolana de compactación

Se verificó que en la arcilla tiene mayor densidad obteniendo un  $1,42 \text{ gr/cm}^3$ , con respecto a la puzolana la densidad máxima es mucho menor obteniendo un valor de  $1,25 \text{ gr/cm}^3$ .

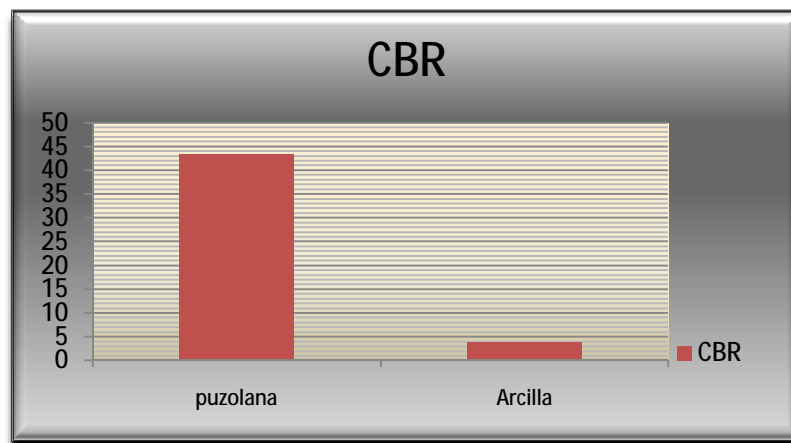


Figura N° 3.8: Gráficas comparativas de suelo y puzolana de CBR

Aquí cabe notar que cuando trabajan solas tanto la puzolana como la arcilla la puzolana es mucho más resistente obteniendo un valor de 43,25 % de resistencia con respecto a la arcilla su resistencia es de 3,89 %.

### 3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO DEL SUELO CON ADICIÓN CAL-PUZOLANA

No existe mucha información, para la adición cal-puzolana por lo que se tomó como parámetro variable el contenido de cal y puzolana en función al ahorro y optimización de los materiales al máximo.

Se hicieron cuatro mezclas, tratando de demostrar la reacción puzolánica, en diferentes adiciones que en nuestro caso es al 3% ,5% y 7% de los cuales se las describe así:

#### Mezcla 1:

3% adición – (20 % puzolana + 80% cal)

3% adición – (40 % puzolana + 60% cal)

3% adición – (60 % puzolana + 40% cal)

3% adición – (80 % puzolana + 20% cal)

#### Mezcla 2:

5% adición – (20 % puzolana + 80% cal)

5% adición – (40 % puzolana + 60% cal)

5% adición – (60 % puzolana + 40% cal)

5% adición – (80 % puzolana + 20% cal)

#### Mezcla 3:

7% adición – (20 % puzolana + 80% cal)

7% adición – (40 % puzolana + 60% cal)

7% adición – (60 % puzolana + 40% cal)

7% adición – (80 % puzolana + 20% cal)

### 3.3.1. LÍMITES DE ATTERBERG

MUESTRA	LL	LP	IP
3% adición20%p-80%c	52,5	45,35	7,15
3% adición40%p-60%c	52,84	50	2,84
3% adición60%p-40%c	54,5	50,75	3,77
3% adición80%p-20%c	51	40,95	10,04
5% adición20%p-80%c	47,43	39,49	7,95
5% adición40%p-60%c	50,6	46,63	3,98
5% adición60%p-40%c	55,44	53,68	1,76
5% adición80%p-20%c	50,06	45,58	4,48
7% adición20%p-80%c	55,61	50	5,61
7% adición40%p-60%c	57,44	52,4	5,03
7% adición60%p-40%c	54,67	50	4,67
7% adición80%p-20%c	55,1	50	5,1

Tabla N° 3.15: Resultados correspondientes al LL, LP y IP de los tres tipos de mezclas

La ligadura entre partículas es debida no sólo al intercambio catiónico, debiendo contemplarse adicionalmente reacciones cementicias inmediatas y los cambios en la tensión superficial del agua que ejerce también fuerzas de atracción en las partículas del suelo afectando al LP.

Vemos en las mezclas un incremento brusco en el límite plástico con relación al líquido lo que muestra la variación del índice plástico.

### Gráficas de comparaciones de adición de IP

3%

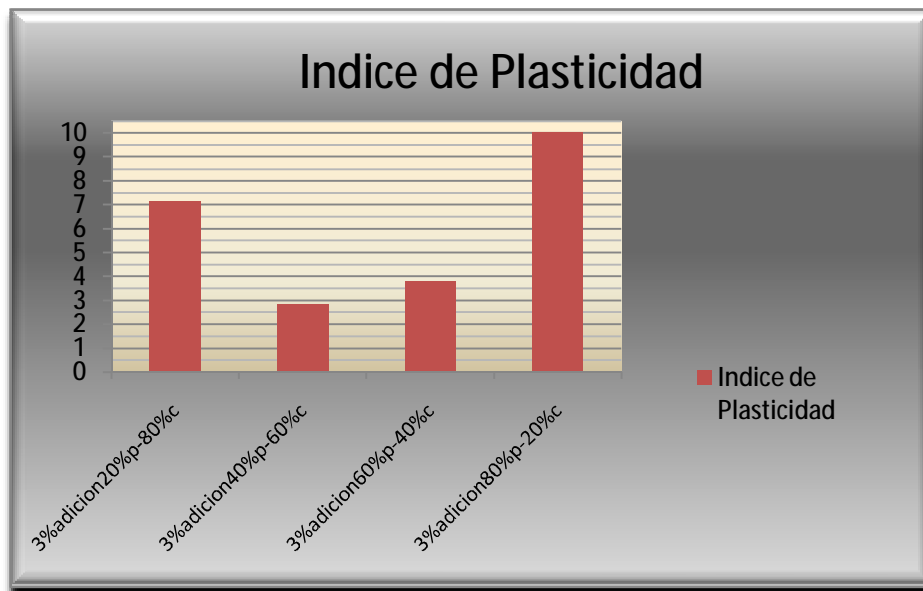


Figura N° 3.9: Gráficas comparativas del 3% de IP en diferentes porcentajes

Se estableció que el incremento 3 % de adición el índice de plasticidad se lo determina en los siguientes parámetros de los ensayos obtenidos en sus incrementos de 20 % puzolana – 80 % cal y 80 % puzolana – 20 % cal su plasticidad es mucho más elevada de 10 y 7 %, en cambio en el incremento a porcentaje de 40 % puzolana -60 % cal y el 60 % puzolana – 40 % cal que tiene menor plasticidad de un 2 y 3 %.

5%

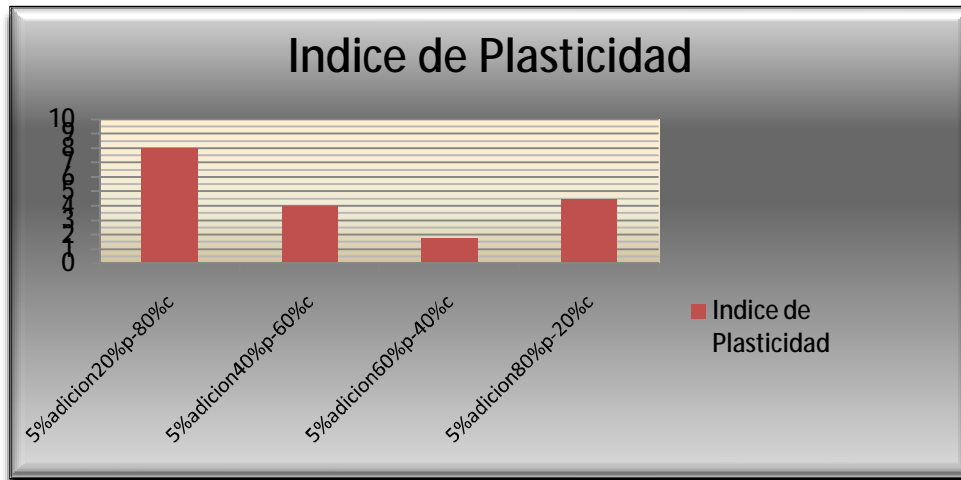


Figura N° 3.10: Gráficas comparativas del 5% de IP en diferentes porcentajes

Se estableció que el incremento 5 % de adición el índice de plasticidad se lo determina en los siguientes parámetros de los ensayos obtenidos en sus incrementos de 20 % puzolana – 80 % cal y 80 % puzolana – 20 % cal su plasticidad es más elevada de 7 y 4 %, en cambio en el incremento a porcentaje de 40 % puzolana -60 % cal y el 60 % puzolana – 40 % cal que tiene menor plasticidad de un 3 y 1%.

7%

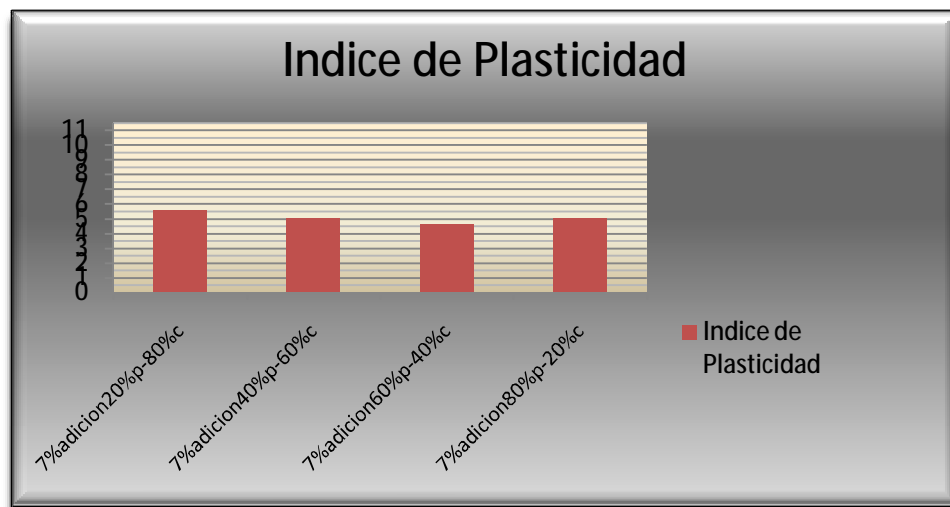


Figura N° 3.11: Gráficas comparación del 7% de IP en diferentes porcentajes

Se estableció que el incremento 7 % de adición el índice de plasticidad se lo determina en los siguientes parámetros de los ensayos obtenidos en sus incrementos de 20 % puzolana – 80 % cal y 80 % puzolana – 20 % cal su plasticidad es mucho más elevada de 5 %, en cambio en el incremento a porcentaje de 40 % puzolana -60 % cal y el 60 % puzolana – 40 % cal que tiene menor plasticidad de un 5 y 4 %.

### 3.3.2. COMPACTACIÓN

Algunos autores verificaron experimentalmente que la remoción de la cal de la solución contenida en los poros produce sólo una baja concentración del electrolito y que los flóculos formados inicialmente persisten y se vuelven más estables con el tiempo. La explicación propuesta incluye la cementación casi instantánea con formación de aluminato tetracálcico hidratado en los bordes de partícula.

La formación de estos productos cementantes en muy pequeñas cantidades se cree que es suficiente para estabilizar los flóculos y enlazar las partículas entre sí de modo que la plasticidad, contracción e hinchamiento son inhibidas y la arcilla es mejorada. Las partículas individuales se hallan bastante cementadas entre ellas dentro de los flóculos, como para resistir la dispersión y los flóculos pueden actuar como granos simples en el análisis mecánico.

#### Gráficas de comparaciones de adición de compactación

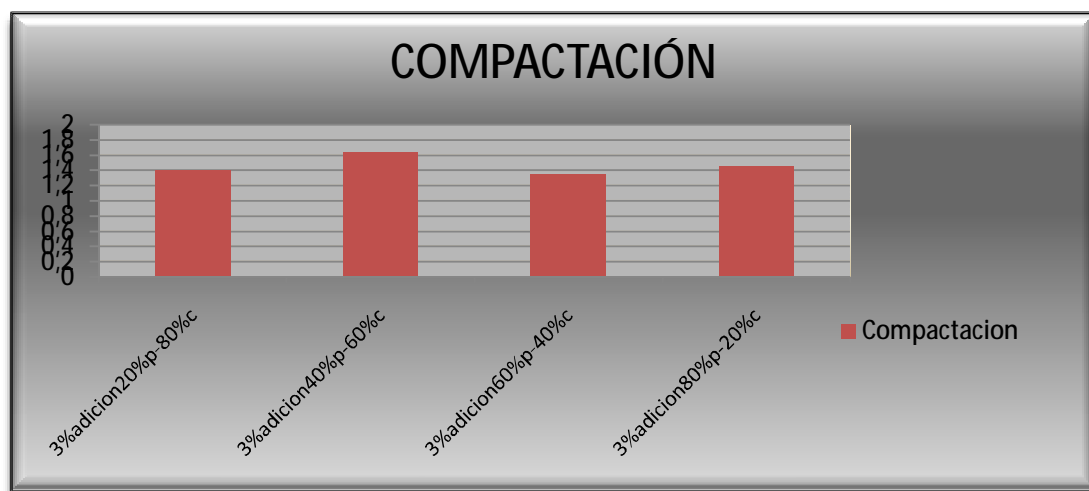


Figura N° 3.12: Gráfica del comportamiento de la compactación para las mezclas de puzolana y cal.

Se verificó que en la adición al 3 % la densidad máxima más alto es del porcentaje de 40% puzolana- 60 % cal con  $1,63\text{gr/cm}^3$  y el porcentaje de 60 % puzolana- 40 % cal es el más menor de  $1,35\text{gr/cm}^3$  y el la adición de 3 % en los porcentajes su densidad máxima 20 % puzolana – 80 % cal y 80 % puzolana – 20 % cal se encuentran semejantes con  $1,41$  y  $1,46\text{ gr/cm}^3$ .

5%

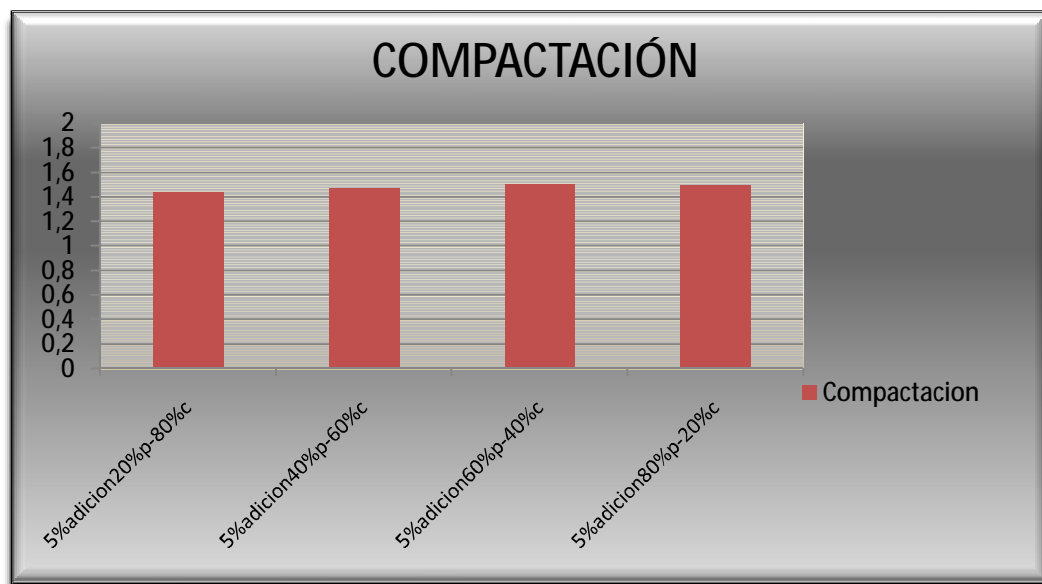


Figura N° 3.13: Gráfica del comportamiento de la compactación para las mezclas de puzolana y cal.

Se verificó que en la adición al 5 % la densidad máxima más alto es del porcentaje de 60% puzolana- 40 % cal con  $1,5\text{ gr/cm}^3$  y el porcentaje de 40 % puzolana- 60 % cal se encuentra en un valor intermedio de  $1,47\text{ gr/cm}^3$  y el la adición de 5 % en los porcentajes su densidad máxima 20 % puzolana – 80 % cal y 80 % puzolana – 20 % cal se encuentran semejantes con  $1,44$  y  $1,49\text{ gr/cm}^3$ .

7%

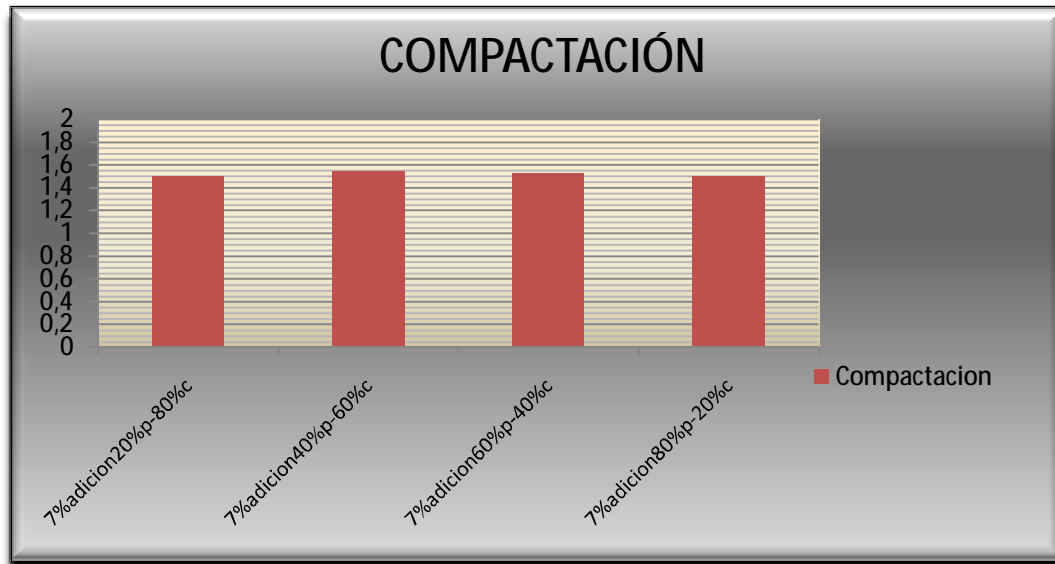


Figura N° 3.14: Gráfica del comportamiento de la compactación para las mezclas de puzolana y cal.

Se verificó que en la adición al 3 % la densidad máxima más alto es del porcentaje de 40% puzolana- 60 % cal con  $1,55\text{gr}/\text{cm}^3$  y el porcentaje de 60 % puzolana- 40 % cal tiene un valor de  $1,53\text{gr}/\text{cm}^3$  y el la adición de 5 % en los porcentajes su densidad máxima 20 % puzolana – 80 % cal y 80 % puzolana – 20 % cal se encuentran iguales con  $1,5\text{ gr}/\text{cm}^3$ .

### 3.3.3. ENSAYO DE VALOR SOPORTE CALIFORNIA (C. B. R.)

En suelos que no registran actividad puzolánica la estabilización se logra con el agregado de materiales puzolánica naturales o artificiales y cal o cemento, para el uso de estas mezclas como capas en paquetes estructurales de caminos

La norma expresa claramente que para mezclas suelo-cal curadas que presenten valores de CBR superiores a 100% (implicando influencia de la cementación), el valor soporte no constituye el método más apropiado de evaluación de la resistencia.

Se observa el comportamiento del CBR, donde actúa en suelos que se producen reacciones cementicias naturales, debidas a los componentes puzolánica, que ya se insinúan con los 4 días de embebimiento, elevando el valor del CBR.

### Gráficas de comparaciones de adición de CBR

3%

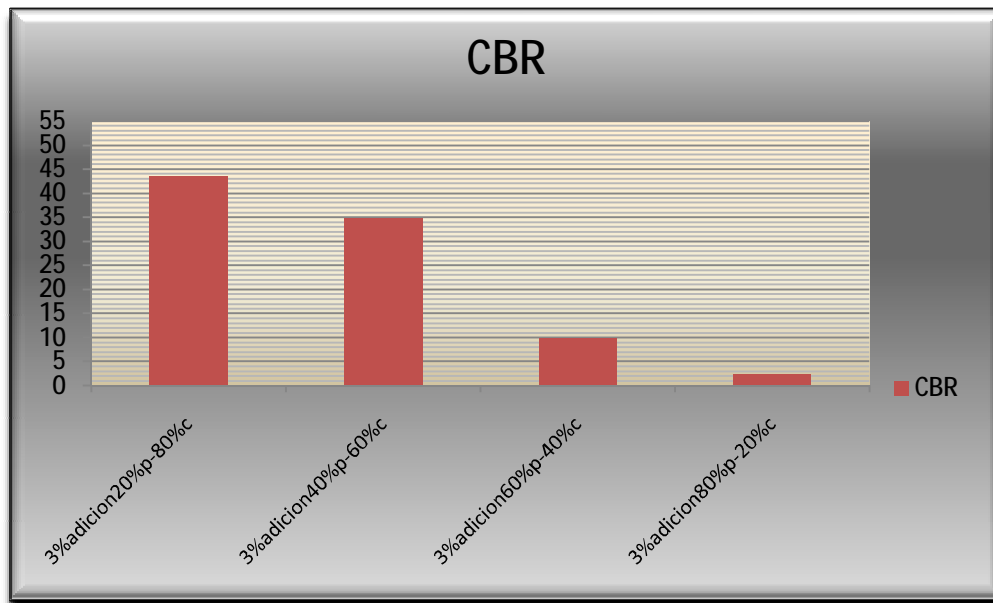


Figura N° 3.15: Gráfica de la influencia de la puzolana-cal en distintos porcentajes en el CBR.

Se establece que el incremento de resistencia en la adición del 3 % se determina en los siguientes parámetros de los ensayos obtenidos en sus incrementos de 20 % puzolana – 80 % cal la resistencia el mucho más obteniendo un 43,64 % sin embargo el los porcentaje de 80 % puzolana – 20 % cal su resistencia es mucho más baja obteniendo 2,41 % en cambio en el incremento a porcentaje de 40 % puzolana -60 % cal el valor es de 34,77 % y el 60 % puzolana – 40 % cal es de 9,81. Se puede observar que a mayor porcentaje de puzolana la resistencia es menor la resistencia y a mayor porcentaje de cal la resistencia es mucho más elevada.

5%

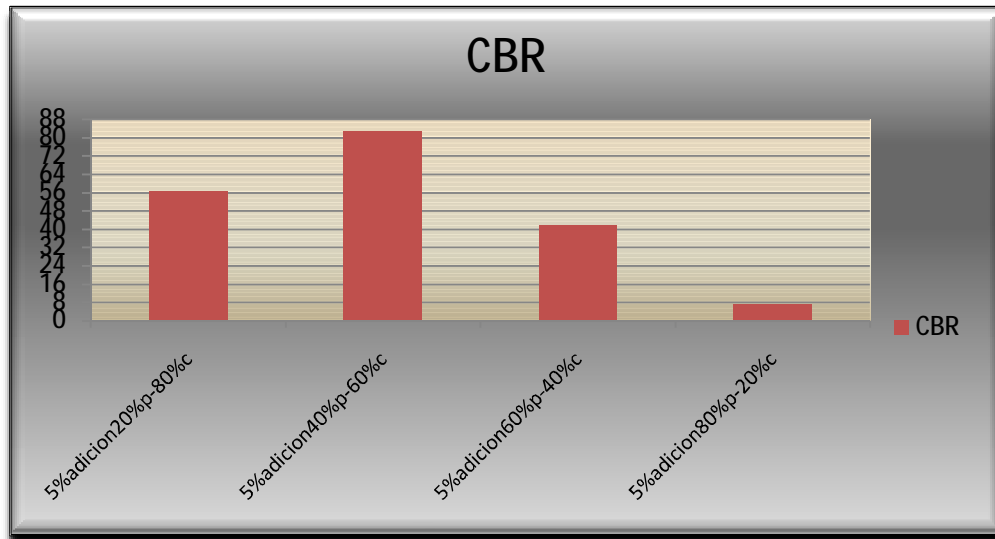


Figura N° 3.16: Gráfica de la influencia de la puzolana-cal en distintos porcentajes en el CBR.

Se establece que el incremento de resistencia en la adición del 5 % se determina en los siguientes parámetros de los ensayos obtenidos en sus incrementos de 20 % puzolana – 80 % cal la resistencia es de 56,5 % sin embargo el los porcentaje de 80 % puzolana – 20 % cal su resistencia es mucho más baja obteniendo 7,2 % en cambio en el incremento a porcentaje de 40 % puzolana -60 % cal el valor es el más elevado de 82,75 % y el 60 % puzolana – 40 % cal es de 41,81. Se verifica la adición de 5 % en porcentajes de 40 % puzolana – 60 % cal la resistencia es la más alta de lo cual la cal sigue siendo el más elevado y se puede observar que la resistencia es la más minina en el porcentaje de 80%p-20%c haciendo conocer que en la anterior adición de 3 % también se dio que el mismo porcentaje la resistencia fue baja eso significa que a mayor puzolana la resistencia es mínima.

7%

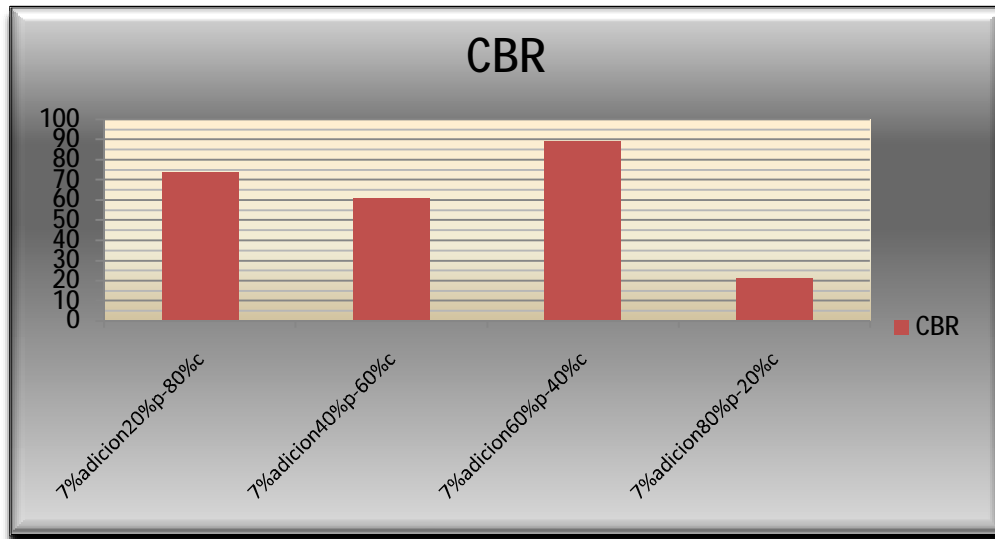


Figura N° 3.17: Gráfica de la influencia de la puzolana-cal en distintos porcentajes en el CBR.

Se establece que el incremento de resistencia en la adición del 7 % se determina en los siguientes parámetros de los ensayos obtenidos en sus incrementos de 20 % puzolana – 80 % cal la resistencia es de 73,88 % sin embargo el los porcentaje de 80 % puzolana – 20 % cal su resistencia es mucho más baja obteniendo 21,43 % en cambio en el incremento a porcentaje de 40 % puzolana -60 % cal el valor es de 60,76 % y el 60 % puzolana – 40 % cal es el más elevado de 89,36. Se verifica la adición de 7 % en porcentajes de 60 % puzolana - 40 % Cal que la resistencia es la más alta de lo cual se puede decir que en es porcentaje de adición la puzolana obtiene buenos resultados siendo el más elevado y se puede observar que la resistencia es la más minina en el porcentaje de 80%p-20%c haciendo conocer que en la anterior adición de 3 % y 5 % también se dio que el mismo porcentaje la resistencia fue bajo.

La expansión es otro indicativo del beneficio que tienen las puzolanas en suelos arcillosos ésta es una característica muy importante ya que es uno de los principales enemigos de una carretera.

El agua que afecta al suelo puro, trabaja en una especie de fraguado en la mezcla (puzolana) y ayuda a mejorar su resistencia y otras características.

Los cationes de calcio de la cal se unen a las superficies de las láminas de la puzolana por efecto de intercambio catiónico, desarrollando fuerzas eléctricas suficientes para contribuir a la formación de puentes que unen las partículas de arcilla. La estabilización se produce principalmente en el primer mes de la reacción. Una acción puzolánica, aparición de minerales nuevos, es la responsable de ganancias de resistencia posterior.

La máxima se obtuvo para el suelo estabilizado con la 3ra mezcla. También puede apreciarse que una estabilización con la segunda mezcla incrementa la resistencia del material en pequeña proporción con respecto al primero

### 3.4. RESUMEN DE RESULTADOS

Características de los Materiales para la Estabilización, el material utilizado arcilla y cal-puzolana.

MUESTRA	LL	LP	IP	D.Máx	H. Opt.	CBR 100% D.Máx	CBR 95% D.Máx
<b>3% adición 20%p-80%c</b>	52,5	45,4	7,15	1,41	26,2	43,64	28,99
<b>3% adición 40%p-60%c</b>	52,84	50	2,84	1,63	19,8	34,77	28,73
<b>3% adición 60%p-40%c</b>	54,5	50,8	3,77	1,35	36,8	9,81	3,97
<b>3% adición 80%p-20%c</b>	51	41	10,04	1,46	19,7	2,41	0,79
<b>3% adición con cal</b>	58,76	50	8,76	1,5	25,8	40,78	28,46
<b>3% adición con puzolana</b>	52,63	50	2,63	1,56	23,6	13,41	11,07

<b>5% adición 20%p-80%c</b>	47,43	39,5	7,95	1,44	27,9	56,5	33,23
<b>5% adición 40%p-60%c</b>	50,6	46,6	3,98	1,47	23,5	82,75	42,19
<b>5% adición 60%p-40%c</b>	55,44	53,7	1,76	1,5	25,1	41,81	27,73
<b>5% adición 80%p-20%c</b>	50,06	45,6	4,48	1,49	23,7	7,2	5,82
<b>7% adición 20%p-80%c</b>	55,61	50	5,61	1,5	27	73,88	56,74
<b>7% adición 40%p-60%c</b>	57,44	52,4	5,03	1,55	20,8	60,76	38,75
<b>7% adición 60%p-40%c</b>	54,67	50	4,67	1,53	25	89,36	50,7
<b>7% adición 80%p-20%c</b>	55,1	50	5,1	1,5	24,8	21,43	15,66
<b>Puzolana</b>				1,25	28,8	43,25	30,74
<b>Arcilla</b>	58,55	50	13,43	1,42	27,2	3,89	2,02

Tabla N° 3.16: características de la estabilización del suelo con cal-puzolana.

En esta tabla de resumen se verifico que en el IP al agregar adiciones del 3 %, 5% y 7% en los porcentajes de 20 % puzolana – 80 % cal; 40 % puzolana – 60 % cal; 60 % puzolana -40 % cal; 80 % puzolana – 20 % cal, de ese orden se determinó que a mayor puzolana y a mayor cal es más elevada su plasticidad comparando con los porcentajes intermedios su IP y son menores.

Con respecto a la resistencia al 100% está en forma descendente ya que la adición al 3% a mayor cal la resistencia es mejor a la de la puzolana. Comparando con el siguiente porcentaje de adición del 5 % de la mezcla con el porcentaje de 40 % puzolana – 60 % cal la resistencia es mayor y de acuerdo con el porcentaje de mayor puzolana ;80 % puzolana – 20 % cal la resistencia sigue siendo la más mínima y por último en la adición de 7 % la resistencia esta en el porcentaje de 60 % puzolana - 40

% cal lo cual se determina que a mayor adición los la puzolana llega a ser más resistente sin obviar los otros porcentajes ya que son también elevados.

Se determinó cuando sólo trabajan arcilla con cal y arcilla con puzolana la más resistente es con cal ya que trabaja mejor, pero sin embargo al trabajar sólo la puzolana es mucho más resistente que la arcilla pura. Verificando en la última adición del 7% donde la puzolana funciona en buenas condiciones.

#### 4.1 CONCLUSIONES

Esta investigación plantea una nueva metodología para la estabilización de suelos que en nuestro caso son arcillas, que toma como punto de partida su particular composición mineralógica.

Se procedió a la extracción existente de un depósito de puzolana tratos de más de 2m. de altura, ubicadas en la zona sur de la Provincia Cercado, ubicado a 500m antes de la localidad de La Pintada y la otra en la zona urbana del barrio Miraflores.

El ensayo químico que se le dio a la puzolana fue por vía húmeda que reveló un porcentaje de sílice más alúmina de alrededor del 95%, con lo cual se verifica el carácter ácido de estos materiales, condición indispensable para ser considerados Puzolánicos. Se observó una gran similitud en los resultados como consecuencia de la mineralogía predominante en las muestras analizadas, conformada principalmente por silicatos, aluminosilicatos. Se obtuvo los cálculos directos por el equipo de T-WIN XRF del el óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

El análisis granulométrico para la puzolana reveló una gran uniformidad con un 86,44% fracción inferior a los 0,0075 milímetros. El análisis por textura permitió identificar unas fracciones limosas predominantes con cantidades de arena y arcilla inferiores. La fracción arcillosa se encuentra muy escasamente representada, coincidiendo con la plasticidad nula que tiene, los valores de incrementos de la resistencia logrados superan a las expectativas de acuerdo a las especificaciones basadas en plasticidad.

En la obtención de comparación de las técnicas que se utilizaron en la estabilización de subrasantes para acondicionar ésta como una obra vial y fundamentando los resultados arrojados de un análisis técnico.

Reflejada en la existencia de dos fracciones mineralógicas: una que puede ser considerada inerte y la otra con actividad Puzolánica, es decir capaz de reaccionar con la cal para formar componentes cementicios o aglomerantes.

Estas reacciones pueden ocurrir en forma natural o a través del agregado de cal-puzolana dentro de un proceso de estabilización de suelos.

El desarrollo de la investigación llevó a conformar comparaciones de suelo-cal y suelo-puzolana:

Se realizó la clasificación del suelo donde el material fue arcilla de media plasticidad, tal es el caso del barrio Panamericano, que es muy conocido por presentar este tipo de material donde es llamado comúnmente ex parada el norte.

Las clasificaciones SUCS y AASHTO revelaron que el aspecto que tenía el material del sitio con respecto a los análisis de laboratorio, no es erróneo ya que se lo puede clasificar como arcillas (CL/A-7-6(15)).

La primera se obtuvo a fin de comparar el comportamiento de forma separada tanto la cal como la puzolana, de ahí se puede ver como cada aditivo puede mejorar o disminuir su resistencia en las condiciones en las que se encuentra el material, calificándola a cada una de las muestras como su calidad, durabilidad y lo más importante su resistencia, en este caso se dio el suelo-cal una buena función del cual se realizó en un solo porcentaje (3%).

De las muestras tomadas de puzolana se integran en clases correspondientes a limos (MH / A-4). Desde el punto de vista geológico. Conforme a los criterios en que se basan estas clasificaciones.

Como se indicó, los resultados de la estabilización con puzolana revelaron variación con respecto al suelo puro excepto en las compactaciones donde se obtuvo densidades máximas casi similares y la resistencia que fue menor a comparación con la cal

Para determinar la importancia producida por la reacción puzolánica se realizaron ensayos de CBR sobre una arcilla pura. Se llevaron a cabo una serie de ensayos de mezclas de arcillas con diversos porcentajes de cal y puzolana, realizándose el ensayo CBR. La metodología empleada permitió evaluar la rigidez lograda en las mezclas de suelos puzolánicos con cal-puzolana por influencia de la cementación, separándola de la que pueden producir aquellas reacciones conocidas como mejoramiento.

Mediante un análisis comparativo entre diversas normas internacionales y nacionales, se sugieren una serie de modificaciones a tener en cuenta para la estabilización con cal la cual se la aplicó para la adición de la puzolana.

El concepto de contenido óptimo de cal y puzolana no brinda información consistente para el diseño de estabilización de arcillas. Del mismo modo otras formas de determinar el contenido óptimo de cal-puzolana para lograr la reacción cementante tales como las variaciones en el índice de plasticidad, CBR con el agregado de la cal-puzolana pueden ser significativas para estos materiales de alta fracción arcillosa.

En mezclas estabilizadas para arcillas, de puzolana-cal se ha determinado de acuerdo a los análisis de resultados el uso de ciertos porcentajes de acuerdo a la función estructural de la capa se lo pudo determinar que adición entra para el mejoramiento de subrasantes, sub-bases y bases.

Como resumen el IP al agregar adiciones del 3 %, 5% y 7% en los porcentajes de 20 % puzolana – 80 % cal; 40 % puzolana – 60 % cal; 60 % puzolana -40 % cal; 80 % puzolana – 20 % cal, en ese orden se determino que a mayor puzolana y a mayor cal es más elevada su plasticidad comparando con los porcentajes intermedios su IP son menores.

Con respecto a la resistencia al 95% está en forma descendente ya que la adición al 3% a mayor cal la resistencia es mejor que de la puzolana. Comparando con el siguiente porcentaje de adición del 5 % de la mezcla con el porcentaje de 40 % puzolana – 60 % cal la resistencia es mayor y de acuerdo con el porcentaje de mayor puzolana ;80 % puzolana – 20 % cal la resistencia sigue siendo la más mínima y por ultimo en la adición de 7 % la resistencia esta en el porcentaje de 60 % puzolana - 40 % cal lo cual se determina que a mayor adición los la puzolana llega a ser más resistente sin obviar los otros porcentajes ya que son también elevados.

Y por último se determinó cuando sólo trabajan arcilla con cal y arcilla con puzolana la más resistente es con cal ya que trabaja mejor, pero sin embargo al trabajar sólo la puzolana es mucho más resistente que la arcilla pura. Verificando en la última adición del 7% donde la puzolana tienen una mayor adición y una buena resistencia.

#### **4.2 RECOMENDACIONES**

Aun habiendo alcanzado los objetivos descritos en la introducción, el carácter de este trabajo impone limitaciones a la amplitud del mismo. Por ello es deseable continuar los estudios aquí desarrollados mediante nuevas líneas de investigación.

El estudio llevado a cabo sobre la cal-puzolana como aditivo para la estabilización de arcillas muestra principalmente que estos poseen una mineralogía muy particular y variada que se ve reflejada en el comportamiento geotécnico. Todo ensayo que implique la saturación de la muestra durante un período de tiempo prolongado puede dar lugar a reacciones puzolánicas o de endurecimiento dependiendo del tiempo e influenciar notoriamente en los resultados esperados. Por lo tanto es recomendable que además de

las propiedades índices se conozca la actividad puzolánica de las muestras a ensayar y de ese modo saber si se está en presencia de un suelo con o sin buena reactividad con la cal e incluso si pueden existir reacciones de autocementación con el solo agregado de agua y compactación.

Como se determinó en esta investigación la velocidad de incremento de resistencia es muy variable para la puzolana, pudiendo llegarse a un óptimo porcentaje. Por lo tanto se sugiere mezclar más porcentajes de a10% en 10%.

Dado que la actividad aglomerante de la puzolana se detecta basándose en los ensayos de plasticidad y granulometría, y por lo tanto tampoco queda explicitada en las clasificaciones de suelos, se deberán utilizar nuevas normas, especificaciones técnicas de ensayos, basados en la determinación directa de la reactividad del suelo con la cal-puzolana, que significa el uso de materiales con cementantes naturales de gran abundancia en el territorio provincial.

Se recomienda la continuidad de esta línea de investigación como una clave para determinar el costo.

Queda establecido que al adicionar ciertos tipos de aditivo, no necesariamente se ven mejoradas todas las propiedades, algunas se pueden ver afectadas.

Para la identificación de la puzolana se puede identificar por estratos o en formas de capas son limos elásticos de coloración blanquecina tiene partículas muy diminutas de color negro, en el caso de que el material este en contacto con el agua su color es tipo marfil y en ese mismo orden determinando el material no plástico.

Y por último hacer un buen uso de la puzolana en nuestro caso para fines constructivos ya que es muy ventajosa.