

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
Vicerrectorado de Investigación y Postgrado

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS:

“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON FIBRA DE TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES SUELOS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, EN LA SUBRASANTE PARA CARRETERAS”

PRESENTADO POR : Br. FERDINAN CCORIMANYA APAZA

Para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil

ASESOR : ING. GIANCARLO VINCET FERNANDEZ VENERO

CUSCO – PERÚ

2016



PRESENTACIÓN

Señor Decano de la FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
“ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL”

Señores miembros integrantes del Jurado.

Cumpliendo con el Reglamento de Grados y Títulos de la FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA “ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL” y con el fin de obtener el Título Profesional de Ingeniero civil, ponemos a vuestra consideración el presente trabajo de Tesis Intitulado **“ESTABILIZACION DE SUELOS CON FIBRAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES SUELOS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, EN LA SUBRASANTE PARA CARRETERAS”**.

Esperando que el trabajo de investigación a nivel de laboratorio, sirva de base para el desarrollo socio-económico de la zona y a la vez sea un paso para tecnificar el uso del PET en la estabilización de suelos en la subrasante de carreteras en la Región del Cusco.

El Autor.



DEDICATORIA

Con infinita gratitud a mis padres:

A mi padre Alejandro Cc.

Como mi maestro, del que aprendí el empuje, la dedicación e imaginación que son tantos o más necesarios que el conocimiento teórico para el éxito.

A mi madre Adelaida A.

Símbolo de abnegación y apoyo incondicional, que sin su ayuda no habría podido ser posible concretar este trabajo.

A mis hermanos: Virginia Cc y Benito M, por ser la inspiración de mis sueños y metas, con quienes de una u otra manera siempre compartimos buenos momentos.

Finalmente, una consideración a quienes desde mi familia, que me brindaron su más decidido y continuo apoyo e incentivo para efectuar y completar esta tarea. Su colaboración y comprensión por las largas horas de dedicación y ausencia que demanda este trabajo.

Ferdinan Cc.



AGRADECIMIENTO

Agradecer a todas las personas que directa e indirectamente contribuyeron con sus ideas, comentarios, datos, experiencias y dejar testimonio de nuestro agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería civil, en especial, a mi asesor Ing. Giancarlo Vincet Fernández Venero, por ser un ejemplo de constancia y perseverancia. Al Ing. Alfredo Gaspar, por su gran apoyo incondicional y a toda la plana de docentes por sus enseñanzas, a los compañeros y amigos por su apoyo solidario e incondicional, como el Sr. Guido Toro Mendoza.



RESUMEN

Para la concepción de este proyecto, se buscaron nuevas alternativas en el reforzamiento de los suelos. Algunos de los suelos del Cusco tienen parámetros de resistencia baja, se buscó mejorar las propiedades mecánicas del suelo y a su vez tener un mejor comportamiento como terreno de soporte, ante las interacciones de las cargas de los vehículos en una carretera y a la vez se buscó la reducción de la contaminación de los PET (Polietileno Tereftalato), para promover la conservación del medio ambiente.

Para este fin se buscó el refuerzo del suelo con las fibras de plástico PET cuya dosificación fue encontrada a través de ensayos de CBR.

En primera instancia, se hizo la caracterización y clasificación de los suelos realizando los ensayos de Análisis Granulométrico del suelo, Límites de Consistencia, Proctor Modificado para obtener los parámetros de densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad para compactación; seguidamente se realizaron los ensayos de CBR, para evaluar la resistencia del suelo o su capacidad de carga CBR.

En una segunda instancia se determinó el porcentaje de peso óptimo y el ancho óptimo de la fibra de PET por medio de ensayos de CBR. Las opciones que se tomaron en cuenta para el ensayo de CBR de los suelos con las fibras de PET fueron dosificados con 0.25 %, 0.5%, 1.0% y 1.5% en peso de PET y 0.25 mm, 0.4 mm, 1 mm y 1.3 mm de ancho de las fibras de PET, las fibras de PET tienen una longitud constante de 5 cm por pruebas preliminares hechos en la TESIS; Análisis del Comportamiento de Suelos Reforzados con Fibra Sintética Toxement, Giovanni A. Rey Nariño; Universidad Industrial de Santander. El propósito de variar estos parámetros es poder ubicar la existencia de un estado óptimo que dependa de la relación del ancho de la fibra y el



porcentaje de dosificación de la fibra de PET y de esta manera llegar a la conclusión de qué porcentaje óptimo en peso de fibra mejorara las propiedades mecánicas del suelo y así medir la ganancia en resistencia comparada con la del suelo en estado compactado sin refuerzo.

Por último se realizaron confrontación de resultados de CBR para la comparación de los resultados de la capacidad de resistir cargas en su estado natural y en el suelo reforzado con fibras de PET.

De los resultados de las pruebas realizadas se comprobó que la adición de fibras de PET mejoró el comportamiento mecánico de los suelos ensayados.



LISTA DE SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials.</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio.</i>
C	<i>Es la cohesión del suelo.</i>
CP-PET	<i>Es el concreto polimérico de botellas de PET.</i>
C_c	<i>Relación de las aberturas de tamices que pasan el 60% y 10% en peso.</i>
C_u	<i>Coefficiente de uniformidad.</i>
DMT	<i>Dimetil tereftalato.</i>
D_{10}	<i>Aberturas de tamices por donde pasan el 10% en peso de la muestra.</i>
D_{60}	<i>Aberturas de tamices por donde pasan el 60% en peso de la muestra.</i>
E_c	<i>Energía Específica o Energía de Compactación.</i>
E_0	<i>Modulo de Young para bajas deformaciones.</i>
G	<i>Grava.</i>
G_s	<i>Gravedad específica de los sólidos.</i>
h	<i>Altura de caída del pisón.</i>
H	<i>Alta plasticidad.</i>
H(%)	<i>Porcentaje de humedad.</i>
IP	<i>Índice de plasticidad.</i>
k	<i>Coefficiente de permeabilidad.</i>
L	<i>Baja y media plasticidad.</i>
LP	<i>Límite Plástico.</i>
LL	<i>Límite Líquido.</i>
MTC	<i>Ministerio de transportes y comunicaciones.</i>
M	<i>Limo.</i>
N	<i>Número de golpes del pisón por cada capa.</i>
O	<i>Limos y arcillas orgánicas.</i>
Psh	<i>Peso de Suelo Húmedo.</i>
Pss	<i>Peso de Suelo Seco.</i>
P	<i>Cargas normales.</i>
P	<i>Pobremente gradada.</i>
Pt	<i>Turbas o fangos.</i>
PEBD	<i>Polietileno de Baja Densidad.</i>
PEAD	<i>Polietileno de Alta Densidad.</i>



<i>PVC</i>	<i>Policloruro de Vinilo.</i>
<i>PP</i>	<i>Polipropileno.</i>
<i>PS</i>	<i>Poliestireno.</i>
<i>PET</i>	<i>Polietileno Tereftalato.</i>
<i>PNUMA</i>	<i>Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.</i>
<i>SUCS</i>	<i>Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.</i>
S	<i>Arena.</i>
<i>T</i>	<i>La fuerza y tangenciales.</i>
<i>TPA</i>	<i>Ácido tereftálico.</i>
<i>W</i>	<i>Peso de pisón compactador.</i>
<i>W</i>	<i>Bien gradada.</i>
<i>V</i>	<i>Volumen total del molde de compactación.</i>
<i>ω</i>	<i>Humedad.</i>
<i>γ</i>	<i>Peso específico húmedo.</i>
<i>γ_d</i>	<i>Peso específico seco, Densidad seca máxima.</i>
<i>μ</i>	<i>Presión de poros.</i>
<i>%E</i>	<i>Porcentaje de expansión.</i>
<i>%CBR</i>	<i>Porcentaje California Bearing Ratio.</i>
<i>IG</i>	<i>Índice de grupo.</i>
<i>τ</i>	<i>Es el esfuerzo normal total en el plano de falla.</i>
<i>φ</i>	<i>Es el ángulo de fricción del suelo.</i>
<i>σ</i>	<i>Esfuerzos externos.</i>



GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS.

1. **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.** Determinación de los distintos tamaños de partículas que forman un suelo.
2. **ARCILLAS.** Granos de suelo que tienen un diámetro medio inferior a las 2 o 5 μm . Un suelo formado por una mayor parte de sus partículas con tamaño inferior a este diámetro se dice que está formado por minerales arcillosos.
3. **AASHTO.** Siglas que corresponden a la entidad Americana American Association of State Highway and Transportation Official.
4. **APARATO CASAGRANDE.** Taza de bronce con una masa de 200 ± 20 g, montada en un dispositivo de apoyo fijado a una base de plástico duro de una resiliencia tal que una bolita de acero de 8 mm de diámetro, dejada caer libremente desde una altura de 25 cm, rebote entre un 75 y un 90%.
5. **ARENAS.** Partículas de suelo con diámetro medio comprendido entre los 0.06 mm y los 2 mm.
6. **ASENTAMIENTO DE SUELOS.** Descenso vertical de la superficie del terreno o del terraplén, debido a la consolidación o fallas del suelo.
7. **BIODEGRADABLE.** Se dice de la sustancia que puede ser atacada por microorganismos, transformándose compuestos cada vez más simples. Se aplica especialmente a residuos industriales o domésticos.
8. **BIORIENTACIÓN.** Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.
9. **CALIBRAR.** Medir o reconocer un calibre. Dar o reconocer el calibre deseado.
10. **CAPILARIDAD.** Fenómeno físico por el que un líquido asciende a través de conductos capilares, y por el que la superficie de un líquido en contacto con un sólido no es horizontal, sino convexa o cóncava. (Diccionario Enciclopédico Lexus, Ed. Lexus, 1997).
11. **CALICATA.** Exploración que se hace en cimentaciones de edificios, muros, caminos, etc., para determinar, identificar y clasificar los materiales constituyentes de los suelos de fundación, a través de estratigrafía y ensayos.
12. **CANTERA.** Sitio de donde se saca piedra, greda u otra sustancia análoga para obras varias.
13. **CBR.** El índice CBR (Razón de Soporte de California) es la relación, expresada en %, entre la presión necesaria para hacer penetrar un pistón de 50 mm de diámetro en una masa de suelo compactada en un molde cilíndrico de acero, a una velocidad de 1,27 mm/min., para producir deformaciones de hasta 12,7 mm (1/2") y la cual se le asigna un valor de 100%.
14. **COHESIÓN (suelo).**- Fuerza de unión entre las partículas de un suelo, cuya magnitud depende de la naturaleza y estructura del mismo. En los suelos



- cohesivos la estructura depende del contenido de minerales arcillosos presentes y de las fuerzas que actúan entre ellos.
15. **COMPACIDAD DE UN SUELO.** Grado de compactación o densidad natural de un suelo no cohesivo, que depende del acomodo alcanzado por las partículas de éste.
 16. **COMPACTACIÓN (SUELO).** Operación mecanizada para reducir el índice de huecos de un suelo y alcanzar con ello la densidad deseada.
 17. **COMPRESIBILIDAD.** Propiedad que presentan los cuerpos de disminuir su volumen cuando se aumenta la presión ejercida sobre ellos, manteniendo constantes otros parámetros.
 18. **DEDUCCIÓN.** Acción de sacar una cosa de su origen o principio.
 19. **DENSIDAD.** Relación entre la masa de un determinado volumen de un cuerpo y la masa del mismo volumen de agua. Para los gases se utiliza como referencia la masa del mismo volumen de aire.
 20. **DENSIDAD MÁXIMA COMPACTADA SECA.** Corresponde a la mayor densidad que puede alcanzar un suelo al ser compactado a la humedad óptima.
 21. **ERRORES DE APRECIACIÓN.** Se trata de un tipo de error casual, asociado a la mínima división de la escala de lectura del aparato utilizado.
 22. **ERRORES CASUALES.** Son errores aleatorios asociados a una medida, cuya causa no se puede determinar. Siempre están presentes en la medida de cualquier instrumento de medición.
 23. **ERROR RELATIVO.** El error relativo a una medida es el cociente entre el error absoluto asociado a esta medida dividido por el valor de la medida misma.
 24. **ERROR SISTEMÁTICO.** Son errores que se repiten constantemente en el transcurso de un experimento y afectan de igual manera a todas las medidas realizadas o a toda una serie de estas medidas. Como están presentes en todos los resultados, afectan al resultado final siempre en un mismo sentido.
 25. **ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.** Mejoramiento de las propiedades físicas y/o mecánicas de un suelo mediante procedimientos mecánicos y/o físico – químicos.
 26. **EXPANSIÓN.** Proceso en que la masa de suelo tiende a aumentar su volumen manteniendo su forma.
 27. **ESTRATO.-** Masa de suelo en forma de capa de espesor más o menos uniforme
 28. **ESTABILIDAD.** Estado de una estructura sometida a carga, sobre la que no actúan, en ningún punto, esfuerzos capaces de superar los límites de elasticidad de los materiales. (Dicc. Sopena. Ed. Sopena).
 29. **ESTÁNDAR.** Tipo, modelo o patrón. Modelo de referencia para comparar con otros de la misma clase. (Diccionario Enciclopédico Lexus, Ed. Lexus, 1997).
 30. **FASES DE UN SUELO.** Se considera que un suelo está formado por tres fases: la fase sólida (formada por los granos), la fase líquida (formada por el fluido intersticial) y la fase gaseosa (el aire que ocupa parte o todo el volumen de poros cuando el suelo está parcialmente saturado o seco).
 31. **FLUIDO INTERSTICIAL.** Fluido (normalmente agua) presente en los poros de un
-



medio.

32. **FLUIDO LIBRE.** Fluido que puede desplazarse por los poros del medio comunicados entre sí, en función de la atracción gravitatoria que sufre.
33. **GRADO DE SATURACIÓN.** Se dice que un suelo está saturado cuando el agua ocupa la totalidad de sus huecos. El grado de saturación es el Cociente entre el volumen de agua y el volumen total de vacío. Se expresa en porcentaje.
34. **GRAVAS.** Partículas de suelo con tamaño superior a los 2 mm. Se dividen en: gravilla (con diámetro entre 2 mm y 40 mm), gravas (diámetro entre 40 mm y 10 cm), bolos (entre 10 cm y 30 cm) y bloques (tamaños superiores a 30 cm).
35. **HUMEDAD (W).** Relación entre el peso del agua (W_w) y el peso del suelo seco (W_s). Porcentaje de agua en peso contenida en el suelo.
36. **HUMEDAD ÓPTIMA.** Porcentaje de humedad para el cual un suelo sometido a una energía de compactación determinada presenta su máxima densidad (DMCS).
37. **ÍNDICE DE CONSISTENCIA (SUELOS).** Es la diferencia entre el límite líquido y la humedad (natural) de un suelo, dividida por el Índice de Plasticidad de éste.
38. **ÍNDICE DE GRUPO.** Índice utilizado en el Sistema AASHTO de clasificación de suelos para efectuar la evaluación en cada grupo. Su valor depende del porcentaje que pasa por 0,075 mm, del Límite Líquido y del Índice de Plasticidad del Suelo.
39. **ÍNDICE DE PLASTICIDAD.** Diferencia numérica entre el Límite Líquido y el Límite Plástico de un suelo.
40. **ÍNDICE LÍQUIDO.** Se define el Índice de Liquidez de un suelo como la razón entre el porcentaje de Humedad Natural menos Límite Plástico y el Índice de Plasticidad. Es decir, cuando la Humedad Natural es igual al Límite Líquido, el Índice de Liquidez es igual a 1.
41. **INDUCIR.** Elevarse el entendimiento desde los fenómenos o hechos particulares hasta la ley o principio de que depende. (Diccionario Sopena. Ed. Sopena).
42. **LÍMITE DE CONTRACCIÓN.** Humedad máxima de un suelo para la cual una reducción de la humedad no origina una disminución de volumen.
43. **LÍMITE LÍQUIDO.-** El límite líquido (LL) es el contenido de humedad que tiene un suelo al momento de pasar de estado plástico a un estado semilíquido. (ASTM D 4318, AASHTO T 89).
44. **LÍMITE PLÁSTICO.** El límite plástico (LP) es la frontera entre el estado plástico y el semisólido de un suelo. En este estado el suelo puede ser deformado rápidamente o moldeado sin recuperación elástica, existen cambios de volumen, agrietamiento o desmoronamiento. (ASTM D 4318, AASHTO T 90).
45. **LIMOS.** Partículas de suelo con diámetro medio comprendido entre los 0.06 mm y los 0.002 mm.
46. **MATRIZ.** Material sólido de un medio.
47. **MINERALES ARCILLOSOS.** Granos minerales de tamaño inferior a 2 μ m.
48. **MUESTRA.** En estadística, el número de medidas realizadas sobre una misma variable para obtener su valor promedio.
49. **MUESTRA DE LABORATORIO.** Cantidad mínima de material necesario para realizar los ensayos de laboratorio requeridos.



50. **MUESTRA INALTERADA.** Muestra extraída sin alterar las condiciones naturales del suelo.
51. **PERMEABILIDAD DE UN SUELO.** Propiedad de los suelos o capas granulares de un pavimento de permitir el paso del agua a través de ellas. Se mide mediante ensayo y se expresa como coeficiente de permeabilidad. Es un indicador de la capacidad drenante del suelo o capa granular.
52. **PESO ESPECÍFICO.** Relación numérica entre peso unitario de un cuerpo y el peso unitario del agua en las mismas condiciones de presión y de temperatura.
53. **POROSIDAD (n).** Relación entre el volumen de huecos y el volumen total
54. **PRECISIÓN.** Obligación indispensable que fuerza a ejecutar una cosa. Exactitud, puntualidad y determinación. (Diccionario Sopena. Ed. Sopena).
55. **SUBBASE GRANULAR.** Capa constituida por un material de calidad y espesor determinados y que se coloca entre la sub-rasante y la base.
56. **SUB-RASANTE.** Plano superior del movimiento de tierras, que se ajusta a requerimientos específicos de geometría y que ha sido conformada para resistir los efectos del medio ambiente y las sollicitaciones que genera el tránsito. Sobre la sub-rasante se construye el pavimento y las banquetas.
57. **TAMIZADO.** Operación que consiste en separar por tamaño las partículas de un agregado, mediante tamices.
58. **TENSIÓN CAPILAR.** Fuerza originada por la tensión superficial de un líquido y que hace que ascienda por un tubo capilar.
59. **TENSIÓN SUPERFICIAL.** La tensión superficial es la fuerza superficial normal a dicha línea por unidad de longitud. La tensión superficial explica el fenómeno de ascensión de un líquido en tubos capilares. Se expresa en dina/cm o erg/cm
60. **TEXTURA DE UN SUELO.** Grado de finura y uniformidad del suelo detectado mediante el tacto, y se describe con términos tales como, harinoso, suave, arenoso, áspero, según la sensación percibida (determinación organoléptica).
61. **TURBA.** Suelos sedimentarios, compuestos principalmente por materia orgánica, parcialmente descompuesta, que se ha acumulado bajo condiciones de excesiva humedad.



INDICE

PRESENTACIÓN	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
RESUMEN	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	VI
GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS.....	VIII
INDICE	XII
INTRODUCCIÓN	XVII
ANTECEDENTES	XIX

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3.1 PROBLEMA PRINCIPAL.....	3
1.3.2 PROBLEMAS SECUNDARIOS	3
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.6.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	5
1.6.2 HIPÓTESIS SECUNDARIAS	5
1.7 VARIABLES.....	6
1.7.1 VARIABLE INDEPENDIENTE	6
1.7.2 VARIABLE DEPENDIENTE	6



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 COMPONENTES DEL SUELO.....	7
2.2 PROPIEDADES IMPORTANTES DEL SUELO EN LA INGENIERÍA.....	7
2.2.1 DENSIDAD	7
2.2.2 FRICCIÓN INTERNA	7
2.2.3 COHESIÓN	8
2.2.4 COMPRESIBILIDAD	8
2.2.5 PERMEABILIDAD.....	8
2.3 CAPACIDAD PORTANTE O VALOR SOPORTE	9
2.3.1 ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO.	10
2.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	13
2.4.1 IMPORTANCIA DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	13
2.4.2. OBJETIVO DE LA ESTABILIZACIÓN	14
2.4.3 LA ESTABILIZACIÓN COMPRENDE:	15
2.4.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIZACIÓN	15
2.4.5 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN	16
2.4.5.1 ESTABILIZACIÓN FÍSICA	16
2.4.5.2 ESTABILIZACIÓN MECÁNICA	16
2.4.5.3 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA	24
2.5 ENSAYOS PARA CARACTERIZAR SUELOS PARA MUESTRAS ALTERADAS E INALTERADAS:.....	26
2.5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS	27
2.5.2 PLASTICIDAD DE LOS SUELOS - LÍMITES DE ATTERBERG	31
2.5.2.1 LÍMITE LÍQUIDO (LL).....	31
2.5.2.2 LÍMITE PLÁSTICO (LP).....	33
2.5.2.3 LÍMITE DE CONTRACCIÓN (LC)	34
2.5.2.4 DETERMINACION DEL INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	35
2.6 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS.....	37
2.7 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.....	37
2.7.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN AASHTO	38
2.7.1.1 SUELOS GRANULARES:	38
2.7.1.2 SUELOS FINOS:	39
2.7.2 CLASIFICACIÓN UNIFICADA DE SUELOS (SUCS).....	41
2.7.2.1 SUELOS GRUESOS:.....	41
2.7.2.2 SUELOS FINOS:	41
2.8 COMPACTACIÓN DE SUELOS.....	44
2.9 MEDIDA DE COMPACIDAD DEL SUELO.....	45
2.10 MÉTODO DE LA COMPACTACIÓN PROCTOR.....	45



2.11 EQUIPO DE COMPACTACIÓN EMPLEADO:	49
2.12 COHESIÓN (C).....	50
2.13 LOS PLASTICOS	51
2.14 POLIETILENO TEREFTALATO (PET)	52
2.15 SITUACIÓN ACTUAL DEL PET EN EL PERÚ	53
2.16 RECICLAJE DE PLÁSTICOS EN EL PERÚ.....	53
2.17 UTILIZACIÓN DEL PET EN LA INGENIERÍA CIVIL	55
2.17.1 VIVIENDAS	55
2.17.2 CONCRETO POLIMÉRICO PET.....	56
2.17.3 LADRILLOS.....	56
2.17.4 PANELES	57
2.18 EL USO DE LOS GEOSINTÉTICOS EN LA MECÁNICA DE SUELOS	58
2.19 TIPOS DE GEOSINTÉTICOS Y SUS APLICACIONES.....	59
2.20 EMPLEO DEL PET EN LA GEOTECNIA.....	59
2.21 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL POLIETILENO TEREFTALATO (PET).....	61
2.22 PRODUCCIÓN DE LA RESINA PET.....	62
2.22.1 EXTRUSIÓN Y PELLETIZADO	62
2.22.2 POLIMERIZACIÓN EN ESTADO SÓLIDO O POST POLIMERIZACIÓN	65
2.22.3 PRODUCCIÓN DE LOS ENVASES.....	65
2.22.3.1 PREFORMAS DE PET PROCESO DE EXTRUSIÓN E INYECCIÓN	66
2.22.3.2 MOLDEO POR INYECCIÓN-SOPLADO.....	67
2.23 ESTRUCTURA DEL PET	68
2.23.1 POLIÉSTER (C ₁₀ H ₈ O ₄)	69
2.23.2 ESTRUCTURA QUÍMICA.....	69
2.24 CLASIFICACIÓN DEL PET.....	70
2.25 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PET	71
2.25.1 DENSIDAD.....	73
2.25.2 ABSORCIÓN DE AGUA	74
2.25.3 PERMEABILIDADES	74
2.25.4 COMPORTAMIENTO FRENTE A LA TEMPERATURA.....	75
2.25.5 COMPORTAMIENTO FRENTE A FACTORES ATMOSFÉRICOS.....	76
2.26 PROPIEDADES QUÍMICAS	76
2.27 PROPIEDADES BIOLÓGICAS.....	79



CAPITULO III

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	80
3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	80
3.1.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	80
3.1.3. METODO.....	80
3.2. UNIDAD DE ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN.....	81
3.2.1. MUESTRA DE ESTUDIO.....	81
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	81
3.3.1. TÉCNICAS.....	81
3.3.2. INSTRUMENTOS.....	81

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROYECTO

4.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR CBR EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON PET PARA SUBRASANTES PARA CARRETERAS.....	82
4.2 MUESTREO DE SUELOS EN CAMPO.....	83
4.3 REDUCCIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS A TAMAÑO DE ENSAYO EN LABORATORIO.....	86
4.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS.....	88
4.5 LÍMITES DE ATTERBERG.....	89
4.5.1 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO.....	89
4.5.1.1 ENSAYO DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO CON REFORZAMIENTO DE PET.....	98
4.5.2 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.....	102
4.5.3 ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS.....	105
4.6 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SUELO.....	106
4.7 ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO.....	111
4.7.1 RESULTADO DE PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO DEL SECTOR DE SAN MIGUEL.....	116
4.7.2 RESULTADO DE PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO DEL SECTOR DE HUANCARO.....	118
4.7.3 RESULTADO DE PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO DEL SECTOR DE PATA PATA.....	119
4.7.4 RESULTADO DE PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO DEL SECTOR DE OSCOLLO PAMPA.....	120
4.8 VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR).....	121
4.9 RESULTADO DE CBR DE LOS SUELOS NATURALES (0% DE FIBRAS DE PET).....	141



4.10 ENSAYOS CBR DE SUELO DE SAN MIGUEL REFORZADA CON ADICIÓN DE LA FIBRA DE PET	142
4.10.1 ENSAYO DE CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 0.25% CON UN ANCHO DE 0.4 MM Y DE LONGITUD DE 5 CM	143
4.10.2 ENSAYO CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 0.5% CON UN ANCHO DE 0.4 MM Y DE LONGITUD DE 5 CM.	143
4.10.3 ENSAYO CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 1% CON UN ANCHO DE 0.4 MM Y DE LONGITUD DE 5 CM.....	143
4.10.4 ENSAYO CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 1.4 % CON UN ANCHO DE 0.4 MM Y DE LONGITUD DE 5 CM.....	144
4.10.5 RESUMEN DE ENSAYOS DE CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 0.25%, 0.5%, 1%, 1.4% CON UN ANCHO DE 0.4 MM Y DE LONGITUD DE 5 CM	144
4.10.6 RESUMEN DENSIDAD SECA DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 0.025%, 0.5%, 1%, 1.5% CON ANCHO DE 0.4 MM Y LONGITUD DE 5 CM.	146
4.11 ENSAYOS DE CBR DE SUELO REFORZADA CON ADICIÓN DE LA FIBRA DE PET CON DIFERENTES ANCHOS.....	147
4.12 RESUMEN DE ENSAYO CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET DE UN ANCHO DE 0.25MM, 0.4 MM, 1MM, 1.4MM Y CON UNA CANTIDAD OPTIMA DE 0.5%, DE LONGITUD DE 5 CM	148
4.13 DENSIDAD SECA DEL SUELO DE SAN MIGUEL – SAN SEBASTIÁN – CUSCO.	149
4.14 ANALISIS Y CONFRONTACIÓN DE RESULTADOS DE CBR CON FIBRA DE PET Y SIN FIBRA DE PET DE LOS SUELOS: SAN MIGUEL, HUANCARO, PATA PATA Y OSCOLLO PAMPA.	151
4.15 RESUMEN CONFRONTACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO CBR DE LOS DIFERENTES SUELOS.	153
4.16 DISCUSIÓN:	155
CONCLUSIONES:.....	159
RECOMENDACIONES:	162
PÁGINAS WEB DE CONSULTA:	164
ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

En toda obra de construcción las cargas que se transmiten al terreno producen tensiones, deformaciones en la capa del terreno de soporte, que varían con el tiempo y que depende de la compactación del terreno, del desplazamiento de las partículas y por la deformación de las partículas. Para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos del Cusco, se reforzó el suelo adicionando fibras de PET (Polietileno Tereftalato), un material de alta resistencia a la tensión.

La industria de plástico en Perú está en crecimiento y genera gran cantidad de residuos al año. En el sector de Cusco; se observa que el mayor porcentaje de los residuos lo representa los residuos orgánicos con un 26.51%, Con respecto a los materiales reciclables tenemos a los plásticos que representan el 18.18% del total de residuos evaluados, siendo el más predominante el PEBD (4) con 10.99%, seguido por el PP (5) con 2.97% y luego por el PET (1) con 2.45%. Estos valores indican los hábitos de consumo de la población y la tendencia actual de utilizar cada vez más envases y empaques desechables. Los residuos de PET son reciclables para la fabricación de nuevos productos como envases, textiles, recipientes, geotextiles, geomallas y geogrillas con materiales poliméricos, etc.

En el **Primer capítulo** están las generalidades del plan del proyecto de tesis.

En el **Segundo capítulo** trataremos conceptos teóricos como los componentes del suelo, sus propiedades, clasificación y evaluación de la resistencia del mismo que nos ayudaran a comprender de mejor manera la investigación realizada.

En el **Tercer capítulo** se hace una descripción de la metodología de la investigación.



En el **cuarto capítulo** se hace una descripción de la investigación realizada como la caracterización del suelo, ensayos de CBR del suelo sin fibra y con fibra, que finalmente se hace una comparación de resultados entre la resistencia del suelo sin fibra y con fibra óptima.



ANTECEDENTES

La historia ha demostrado los primeros intentos por reforzar los suelos, con raíces, ramas, pieles, etc. Entre los ejemplos existentes se pueden citar las murallas de Ziggurat de Agar Quf (Mesopotamia, 1400 A.C.) y las de China (200 A.C.), donde fueron empleadas mezclas de suelos reforzados con raíces. Por otra parte, los babilonios utilizaron como reforzamiento ramas de palmera entrelazadas en la construcción de las torres gigantes, mientras los egipcios muestran el uso de esteras. Un ejemplo interesante en América del Sur es la aplicación de la lana de llama mezclada con el suelo, hecho por los incas en las construcciones de las calles en el Perú.

En México, los Mexicas; en el suelo lacustre de la antigua Tenochtitlán. Para la construcción de la ciudad pusieron en práctica procedimientos geotécnicos avanzados que continúan siendo vigentes en la actualidad, como son el mejoramiento masivo del terreno mediante el hincado de troncos.

En diversos países sudamericanos se utilizan también paja, caña y piedra. Dichas estructuras, constituidas de materiales naturales, no siempre tuvieron éxito para resistir las cargas a las que eran expuestas y por la filtración del suelo que disminuye las condiciones de estabilización, se convirtieron en ejemplos comunes de la vulnerabilidad del uso de estos materiales.

Durante la Segunda Guerra Mundial, por la falta de suministros de materias primas; debido a este hecho en diferentes países iniciaron investigaciones que llevaron al desarrollo y producción de distintos materiales. Alemania, por ejemplo, que perdió sus fuentes naturales de látex, inició una investigación que llevó al desarrollo de un caucho sintético utilizable.

En 1926 en Estados Unidos de América, se dio el primer intento de uso de fibras sintéticas en el refuerzo de la estructura de un pavimento. El propulsor de dicho experimento fue el Departamento de Vías de Carolina del Sur 1935. El ensayo consistió en disponer una gruesa capa de algodón sobre la capa de



base del pavimento flexible para luego verter asfalto caliente sobre la fibra y protegerlo con una delgada capa de arena. Mostrando una reducción de las fallas localizadas y el agrietamiento en la estructura, además de buenas condiciones de servicio antes de que la fibra se deteriorara completamente.

Así, buscando un material, surgió el descubrimiento del Polietileno Tereftalato (PET). Posteriormente el PET fue patentado como un polímero termoplástico por los químicos ingleses John Rex Whinfield y James Tennant Dickson en 1941, desarrollaron poliésteres saturados con punto de fusión más alto dentro de los cuales se encuentra el PET. Se empezó a utilizar industrialmente como fibra textil siendo ésta su primera aplicación, también se utilizó para fabricar cintas de películas.

Alrededor de 1973 la industria del plástico buscaba desarrollar un material irrompible, ligero y transparente para producir botellas para bebidas carbonatadas. Investigaciones realizadas por el ingeniero Nathaniel Wyeth concluyeron en que el PET era el material más adecuado, convirtiéndose en 1977 el envase ideal para la distribución moderna y a principios de la década de los 80's el PET atravesó por una expansión vertiginosa que resultó en la existencia de diferentes grados de PET que permiten su uso como plástico de ingeniería para productos donde la resistencia térmica y dieléctrica.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.

Las canteras difícilmente se encuentran cercanas a las carreteras en construcción, y los suelos que se encuentran cerca no cumplen las especificaciones técnicas de subrasante, en su mayoría algunos suelos no cumplen con los requerimientos necesarios para un proyecto de pavimentación, por su baja capacidad de soporte y mala calidad debido a su naturaleza, pues se producen hundimientos o asentamientos que deterioran rápidamente la vía.

Las alternativas de estabilización de suelos que existen son como la estabilización con cal o con cemento, las estabilizaciones con resinas naturales o artificiales, también son válidas; pero la estabilización que se propone tiene un valor agregado que se construye o se realiza con botellas de gaseosa descartable y que contribuye a la preservación del medio ambiente porque se reusa estos elementos es decir se recicla.

En el ámbito nacional, unos de los principales problemas que tenemos en nuestro país, es la inestabilidad de suelos y sus fallas por aplicaciones de cargas ante condiciones adversas de clima; para prevenir problemas de este tipo es necesario someter al suelo a un tratamiento de “Estabilización de Suelos” para mejorar las propiedades físico – mecánicas del suelo en carreteras.

En la Región Cusco en especial, siendo necesario probarlas en nuestra realidad como una alternativa de solución, donde existen épocas de lluvia, donde los mayores problemas que traen son la desestabilización de suelos por el tránsito y la humedad, ocasionando tragedias y cierre de carreteras, se requiere buscar una solución para mejorar las propiedades mecánicas del



suelo debido a la saturación de éste y buscar un uso a los Residuos de Plástico para dar una posible solución a la estabilización de suelos, con la construcción de terraplenes y dar un refuerzo adicional al suelo para que pueda cumplir con las características que exigen la estabilidad, particularmente en la construcción de caminos de tierra (subrasante).

En lo económico para solucionar este problema se empleara una alternativa de estabilización para el mejoramiento de las características mecánicas del material, evitando elevados costos de obra por los grandes espesores de pavimento a ser proyectados.

Se quiere buscar una aplicación de los residuos de plástico generados por la industria, hacia el refuerzo de los suelos, para mejorar sus propiedades mecánicas y aprovechar los materiales reciclables en la construcción de obras civiles. Se ha encontrado que el plástico es un material resistente a esfuerzos de tracción por lo que sería un agregado favorable para complementar la resistencia en los suelos sometidos a tracción.

Un suelo en estado confinado puede resistir apropiadamente esfuerzos de compresión; pero al someterse a esfuerzo de tracción puede fallar fácilmente. La resistencia a corte de un suelo está condicionada por su cohesión y por la fricción interna de los granos, ningún suelo posee las propiedades para resistir esfuerzos a tracción, la fuerza de fricción interna del suelo podría ser incrementada agregando materiales de refuerzo.

En lo ambiental, teniendo en cuenta que el plástico es un residuo producido por la humanidad, se podría dar uso a estos para generar nuevas alternativas para el refuerzo del suelo dando una solución a los problemas de estabilización de suelos que pueda ser utilizado en las capas inferiores del pavimento para carreteras y solucionando problemas ambientales.

Con este proyecto de investigación se busca el perfeccionamiento de las propiedades mecánicas de los suelos, agregando residuos de plástico reciclado del PET (polietileno Tereftalato).



1.2 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

- Espacial: 4 suelos del Cusco
- Temporal: 2016 a 2017.
- Cuantitativa: 60 muestras de suelo para CBR.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 PROBLEMA PRINCIPAL

¿Cuál es el efecto de las fibras en el reforzamiento del suelo, a través de inclusiones aleatorias de fibras sintéticas discretas (PET), que tienen que ser mezcladas con el suelo para conseguir la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada?

1.3.2 PROBLEMAS SECUNDARIOS

- ¿Cuál es el mejor ancho de las fibras de PET al ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, que mejoran resistencia mecánica o capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada?
- ¿Cuál es la cantidad de estas fibras de PET que tienen que ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, que mejoran la resistencia mecánica o la capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada?
- ¿Cuáles son las características de los suelos del Cusco que son ideales para conseguir la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada?



1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el mejor ancho de las fibras de PET al ser mezcladas con el suelo en forma aleatoria, la cantidad de estas fibras de PET que tienen que ser mezcladas con los suelos y qué características debe tener los suelos para conseguir la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el mejor ancho de las fibras de PET al ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, que mejora la resistencia mecánica o capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada.
- Determinar la cantidad de estas fibras de PET que tienen que ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, que mejoran la resistencia mecánica o la capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada.
- Determinar las características de los suelos del Cusco que son ideales para conseguir la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada.

1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio de investigación se justifica por la necesidad de solucionar la baja capacidad portante de suelos, que inicialmente no cumplen con los mínimos requisitos para ser utilizadas como subrasante; ya que estos parámetros generalmente no se ajustan a los requerimientos del proyecto pero con la adición de fibras sintéticas PET, se llegan a cumplir con estos mínimos



requisitos. La búsqueda del mejoramiento de las condiciones ambientales ha llevado a la utilización de los residuos del plástico para reforzar el suelo y mejorar sus propiedades mecánicas y físicas.

También es importante por las siguientes razones:

- Es una nueva alternativa para la estabilización de suelos en nuestra región.
- Es generador de nuevas investigaciones, utilizando otros aditivos como tuberías de PVC.
- Motiva a la ampliación de la investigación, mediante la realización de ensayos que midan la acción de la resistencia a la capacidad de carga insitu, o ensayos con muestras inalteradas.
- Contribuye a reciclar materiales plásticos como botellas de gaseosas o agua.

1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.6.1 HIPÓTESIS GENERAL

Mejoramiento de suelo con la adición de fibras de PET con un ancho, longitud y cantidad óptima, como una nueva alternativa para el reforzamiento de Subrasante de baja capacidad de carga, que al ser mezcladas con el suelo de propiedades seleccionadas se mejoraría la resistencia mecánica o la capacidad de carga del suelo CBR para fines de subrasante.

1.6.2 HIPÓTESIS SECUNDARIAS

- Con el ancho óptimo de las fibras de PET al ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, mejoraría la resistencia mecánica o capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada.



- Con la cantidad óptima de estas fibras de PET que tienen que ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, mejoraría la resistencia mecánica o la capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada.

- La selección adecuada de las propiedades y características de los suelos seleccionados del cusco que son ideales, se obtendría la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material de subrasante mejorada.

1.7 VARIABLES

1.7.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

De la hipótesis Principal: Fibras de PET

- De la hipótesis secundaria:
- Ancho de las fibras de PET.
 - Cantidad de las fibras de PET
 - Propiedades del suelo

1.7.2 VARIABLE DEPENDIENTE

De la hipótesis principal: Capacidad de carga CBR.

De la hipótesis secundaria: Capacidad de carga CBR



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

2.1 COMPONENTES DEL SUELO

El suelo es un material no homogéneo cuyas propiedades son influenciadas por los cambios de humedad y densidad. Su clasificación según sus componentes es:

- Inorgánicos: Constituidos de minerales, por arena, arcilla, agua y aire.
- Orgánicos: Compuesto de minerales por arena, arcilla, agua y aire. Si aparte de estos elementos se suman los restos de las plantas y animales que a su vez producen el humus, de color amarillento a negro¹.

2.2 PROPIEDADES IMPORTANTES DEL SUELO EN LA INGENIERÍA

2.2.1 DENSIDAD

Es la cantidad de masa o materia por unidad de volumen. Una de las propiedades ingenieriles más importante del grado de compactación en términos es la densidad seca máxima determinada en una prueba de laboratorio del diagrama densidad seca versus porcentaje de humedad².

2.2.2 FRICCIÓN INTERNA

Fricción interna es la porción de la resistencia al corte de un suelo, producida por el frotamiento de sus partículas entre sí. Todos los suelos de granos grandes y rugosos como las arenas, poseen fricción interna³. El valor aumenta junto con la angularidad, densidad y granulometría de las partículas y es relativamente indiferente con el tamaño de las partículas, la velocidad de carga pero puede aumentar o disminuir bajo cargas cíclicas o repetitivas.

¹ Juárez Badillo Y Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos Tomo I. México 2005; Pág. 34

² Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial MTC. Lima, 2008. Pág. 17.

³ Msc. Ing. Antonio Timaná Fiestas. MECANICA DE SUELOS II. Universidad Nacional de Piura Facultad de Ingeniería Civil



2.2.3 COHESIÓN

Es la otra porción de la resistencia al corte originado por la atracción de las partículas del suelo, entre sí. Esta cohesión puede ser real o aparente. La cohesión real se produce por la atracción molecular de las partículas, despreciable en general, y la aparente se atribuye a la tensión capilar de las películas de agua que rodean a aquellas partículas, por la atracción electrostática de las superficies cargadas, produciendo la fuerza de vinculación entre ellas. En resumen la cohesión de un suelo depende de las características físico-químicas de su superficie interna, y de su contenido de humedad. Las arcillas son ejemplo de los suelos altamente cohesivos. Los suelos no plásticos fino-granulares presentan una aparente cohesión cuando se encuentran saturados parcialmente⁴.

2.2.4 COMPRESIBILIDAD

Esta propiedad tiene características de Esfuerzo - Deformación debido a que la aplicación de esfuerzos provoca cambios en el volumen y desplazamientos de partículas del suelo⁵.

2.2.5 PERMEABILIDAD

Es la capacidad que tiene un suelo en permitir el flujo de líquidos, esto depende del tamaño del espacio poroso del suelo y del tamaño de las partículas⁶.

⁴ Msc. Ing. Antonio Timaná Fiestas. MECANICA DE SUELOS II. Universidad Nacional de Piura Facultad de Ingeniería Civil

^{5,6} Prof. Dr. Jorge A. Capote Abreu. La Mecánica de Suelos Y las Cimentaciones: <http://grupos.unican.es/gidai/web/asignaturas/CI/Cimentaciones.pdf>



2.2.6 RESISTENCIA AL CORTE

Está dada por la siguiente fórmula de Coulomb hallada en 1773:

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (2.1)$$

Dónde:

τ : Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

σ : Es el esfuerzo normal total en el plano de falla por corte.

φ : Es el ángulo de fricción interna del suelo.

C: Es la cohesión del suelo.

Esta fórmula interpreta la resistencia de los suelos por medio de un mecanismo friccional, en este modelo, las partículas, poseen cierta resistencia al desplazamiento relativo entre sí dado por el rozamiento y la cohesión. La resistencia friccional aumenta debido a la carga, ya que las fuerzas normales a la superficie de contacto aumentan. Por otro lado la cohesión es un factor de la fuerza de atracción entre el agua y las partículas (adhesión). A ello se debe sumar la presencia de finísimas partículas de geometría filiforme provenientes de la fracción arcillosa, que aportan a la formación de canalículos de efecto capilar que toma gran gran importancia⁷.

2.3 CAPACIDAD PORTANTE O VALOR SOPORTE

Es la capacidad de soporte o resistencia del suelo a la acción de las cargas por unidad de área. Tal que no se produzca un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo⁸. Las deformaciones que experimenta no sólo dependen del “Tipo de suelo”, sino también del estado en que se encuentre éste en cuanto a su contenido de humedad, grado de compacidad, estructura interna, etc. el suelo subyacente a una fundación puede presentar

⁷ Juárez Badillo Y Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos Tomo I. México 2005. Pág. 373.

⁸ Luis González de Vallejo, Mercedes Ferrer, INGENIERÍA GEOLÓGICA, Madrid, 2002, Pág. 583.



heterogeneidades de importancia, causando grandes variaciones de resistencia según la dirección de aplicación de las tensiones (anisotropía).

Cuando un suelo es sometido a carga, sufre una deformación; si alcanza el valor límite de su resistencia, el suelo sufre una rotura o falla por corte. Entonces, debe haber un factor de seguridad a la falla por corte, para que la estructura solicitante no sufra una deformación tal que le produzca daños.

Por eso que todos los métodos destinados a determinar la capacidad de carga de un suelo, se basan en el esfuerzo cortante directa o indirectamente.

La complejidad del problema lleva a la siguiente definición de capacidad de soporte: La capacidad de soporte de un suelo es la carga por unidad de área, para una superficie de forma y dimensiones determinadas, que no produce más que un asentamiento previsto.

2.3.1 ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO.

Al igual que los ensayos de corte, las propiedades en un punto de la masa de suelo. También puede usarse los datos de penetración para establecer relaciones con la cohesión y la fricción del suelo.

Un caso particular de ensayo de penetración, ampliamente usado en obras viales, es el denominado comúnmente como CBR⁹ (California Bearing Ratio). Para este ensayo se emplea una muestra de suelo de 150 mm de diámetro y 116 mm de altura, compactada en un molde cilíndrico de acero. Antes de realizar el ensayo generalmente se satura para simular las condiciones más desfavorables en cuanto a drenaje de un camino y para determinar su posible expansión. Junto con la saturación y durante la penetración, se somete la muestra a una presión (sobrecarga) igual a la que producirá el futuro pavimento.

⁹ El ensayo CBR (*California Bearing Ratio*) Evalúa la capacidad portante de suelos en terraplenes, explanadas y capas de base o subbase en firmes. Consiste en compactar y sumergir en agua las probetas y realizar un punzamiento sobre la muestra. Este índice indica el porcentaje de presión ejercida por el pistón sobre el suelo para una penetración determinada con relación a la presión correspondiente a la misma penetración en una muestra tipo. Luis González de Vallejo, Mercedes Ferrer, INGENIERÍA GEOLÓGICA, Madrid, 2002, Pag 583



Existen diferentes tipos de C.B.R. como son¹⁰:

- C.B.R: suelos perturbados y remoldeados.
 - Suelos gravosos y arenosos
 - Suelos cohesivos poco o nada plásticos.
- C.B.R. suelos inalterados.
- C.B.R. in situ.

El método CBR comprende los 3 ensayos siguientes:

- Determinación de la densidad y humedad.
- Determinación de las propiedades expansivas del material.
- Determinación de la resistencia a la penetración.

A continuación utilizando el método 2 de las normas MTC E 132 (ASTM D698-70 ó D1557-70 para el molde de 15.2 cm de diámetro), se debe compactar las muestras utilizando las siguientes energías de compactación:

Tabla. 2.12. Método de compactación para diferentes tipos de suelo

Método	Golpes	Capas	Peso del martillo N
D698: 2 (suelos de grano fino)	56	3	24.5
4 (suelos gruesos)	56	3	24.5
D1557: 2 (suelos de grano fino)	56	5	44.5
4 (suelos gruesos)	56	5	44.5

Fuente: Joseph E. Bowles, Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil, 1981, McGRAW-HILL de México Pag. 190.

En este ensayo se mide la carga necesaria para hacer penetrar un pistón de 50±5 mm de diámetro en una masa de suelo compactada en un molde cilíndrico de acero, a una velocidad de 1,27 mm/min, para producir deformaciones de hasta 12,7 mm (1/2”). Esta carga se relaciona con una carga estándar y el resultado final se expresa en porcentaje. La curva de comparación

¹⁰ Ing. Luis Chang Chang Laboratorio Geotécnico; Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo32_p.pdf



se llama curva patrón y corresponde a un chancado normalizado al cual se le asigna un valor CBR de 100%.

La expresión que define al CBR, es la siguiente:

$$CBR = (carga\ unitaria\ del\ ensayo / carga\ unitaria\ patrón) * 100 (\%). \quad (2.2)$$

De la ecuación se puede ver que el número CBR, es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica el símbolo de (%) se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero.

Se deben confeccionar como mínimo tres probetas con distinta energía de compactación, de tal manera que la densidad a la cual se desee determinar el CBR, quede entre dos probetas. Generalmente se utilizan probetas compactadas con 56, 25 y 10 golpes. Los requisitos de calidad de material para subrasante es la siguiente:

Para la obtención del valor CBR de diseño de la subrasante, se debe considerar lo siguiente:

1. En los sectores con 6 o más valores de CBR realizados por tipo de suelo representativo o por sección de características homogéneas de suelos, se determinará el valor de CBR de diseño de la subrasante considerando el promedio del total de los valores analizados por sector de características homogéneas.
2. En los sectores con menos de 6 valores de CBR realizados por tipo de suelo representativo o por sección de características homogéneas de suelos, se determinará el valor de CBR de diseño de la subrasante en función a los siguientes criterios:

Si los valores son parecidos o similares, tomar el valor promedio.

Si los valores no son parecidos o no son similares, tomar el valor crítico (el más bajo) o en todo caso subdividir la sección a fin de agrupar



subsectores con valores de CBR parecidos o similares y definir el valor promedio. La longitud de los subsectores no será menor a 100 m.

Son valores de CBR parecidos o similares los que se encuentran dentro de un determinado rango de categoría de subrasante, según tabla 2.2.

- Una vez definido el valor del CBR de diseño, para cada sector de características homogéneas, se clasificará a que categoría de subrasante pertenece el sector o subtramo, según lo siguiente:

Tabla 2.2 Categorías de Subrasante

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: Manual de Carreteras MTC: “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos, Pág. 40.

2.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

2.4.1 IMPORTANCIA DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Es el proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento para corregir alguna deficiencia o alterar sus propiedades físicas o mecánicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos y/o físico-químicos, los materiales estabilizadores tienen una doble función, dar al conjunto una determinada rigidez y mantener esta característica evitando que la posible absorción de agua no exceda los límites convenientes, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas dándole estabilidad en cualquier condición de tiempo y servicio”.



El objetivo es el aumento de la capacidad de carga y una disminución de su sensibilidad frente al agua dependiendo del tipo de suelo y otras condiciones medioambientales desfavorables.

Los suelos son resistentes y aptos cuando las cargas no vencen su resistencia al corte. Esta resistencia depende de la fricción en el caso de gravas o arenas, y de la cohesión en los suelos arcillosos.

Así sucede con los suelos predominantemente arcillosos y con los limosos, capaces de absorber y retener proporciones elevadas de agua. Pero cuando tienen una cierta cantidad de agua se hacen plásticos y deformables llegando incluso a fluidificarse.

El suelo natural posee una composición granulométrica y la plasticidad así como el grado de humedad necesario para que, una vez apisonado, sea utilizado en un camino firme y que no sea susceptible a las heladas y a los cambios de volumen¹¹.

2.4.2. OBJETIVO DE LA ESTABILIZACIÓN

La estabilización de suelos tiene por objeto proponer por diversos medios la estabilidad de ellos para cualquier condición de tiempo y de servicio.

Estos medios o procesos van desde la incorporación a los suelos de materiales o nuevos elementos que proporcionen estabilidad con suficiente resistencia a la acción destructora y deformante de las cargas, hasta la formación de verdaderos mecanismos de defensa contra la acción de las fuerzas climáticas a través del tiempo¹².

¹¹ Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. California USA, Int. Thompson Editores, 2001 (7ma edición) Pág. 709

¹² Tesis: Evaluación de aditivos químicos en la eficiencia de la conservación de superficies de rodadura en carreteras no pavimentadas; choque Sánchez, Héctor Martín; Lima- Perú 2012 UNI.



2.4.3 LA ESTABILIZACIÓN COMPRENDE¹³:

- a) Compactación.
- b) Mezcla granulométrica.
- c) Adición de compuestos especiales (antes de mezcla y/o compactación).

2.4.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIZACIÓN

Las propiedades de los suelos están influenciadas por varios factores que pueden agruparse:

a) Factores en su composición:

- Tipos y cantidades de minerales en la estructura del suelo.
- Tipos de cationes absorbidos.
- Forma, tamaños y distribución de las partículas de suelos (Granulometría).
- Cantidad de agua en los poros.

b) Factores ambientales:

- Contenido de humedad.
- Densidad.
- Presión atmosférica.
- Temperatura.
- Estructura del suelo.
- Cantidad de precipitación y evaporación.

c) Factores externos:

- Velocidad del vehículo.
- Número de ruedas por vehículo.
- Número de vehículos.
- Peso del vehículo.

¹³ Compactación de suelos Pag.154:https://www.academia.edu/8939510/Compactaci%C3%B3n_de_suelos_Cap%C3%ADtulo_14_154_CAP%C3%8DTULO_14_COMPACTACI%C3%93N_DE_SUELOS



2.4.5 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN

2.4.5.1 ESTABILIZACIÓN FÍSICA

Este se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo, comprende en buscar una buena granulometría usando materiales granulares o cohesivos. Hay varios métodos como es la¹⁴:

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

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

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

2.4.5.2 ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia, como estabilización mecánica tenemos la **Compactación**; los factores inherentes al suelo que condicionan la compactación, están vinculados a las características de las partículas, a saber:

¹⁴ Alfonso, Rico Rodríguez. La ingeniería de suelos en las vías terrestres Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. México: Limusa. 2005. Pág. 155.



- Forma.
- Textura de la superficie.
- Orientación relativa entre partículas.
- Distribución de los tamaños (granulometría).
- Actividad superficial.

COMPACTACIÓN: Este mejoramiento generalmente se hace en la subrasante, subbase, base y en las carpetas asfálticas.

Compactar es densificar, para ganar capacidad portante se logra mayor peso unitario de material en la unidad de volumen. El procedimiento de compactación en obra consiste en la distribución del material en capas para proceder luego a su densificación gradual mediante pasadas de equipo para lograr el objetivo, equipo éste que responde a determinadas características de acuerdo al material que se desee compactar.

Pero, ¿cómo incide la compactación en la capacidad portante?; la entrega unitaria de trabajo, debe ser suficiente para vencer la resistencia al corte del suelo. Ello se expresa en la desigualdad de la ley de Coulomb:

$$\text{Trabajo externo} > C + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (2.3)$$

Sabemos que la resistencia al corte responde a la ecuación anterior 2.1: ($\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi$).

El segundo término aumentará al haber mayor cantidad de puntos de contacto y mayor trabazón entre partículas aumentando el ángulo de fricción φ .

Se utiliza un agente que permita el mejor acomodamiento entre las partículas, por lubricación entre ellas el agua, es lo que denominamos humedad óptima de compactación.

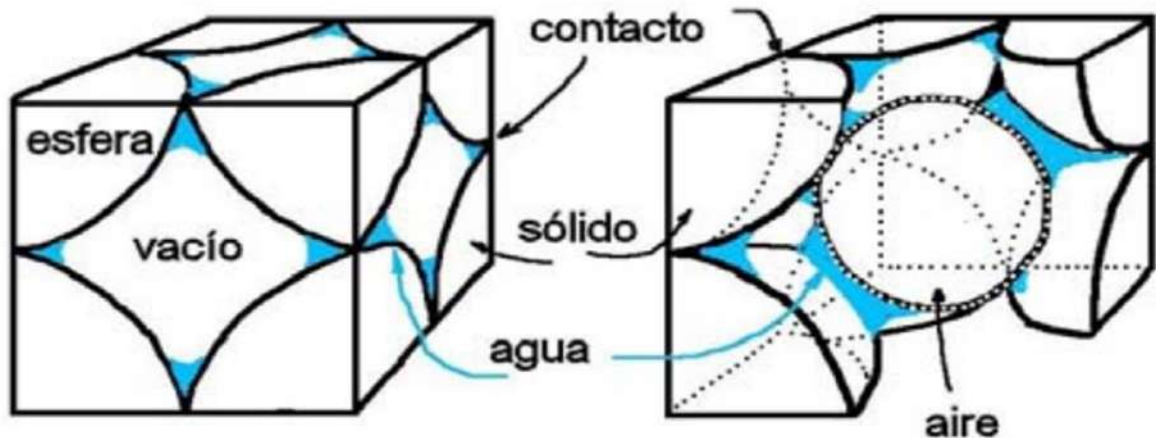
Para determinada energía de compactación se utiliza una curva de la densidad seca en función de la humedad, observándose un máximo de la

densidad seca que precisamente corresponde a la humedad óptima, con la cual deberá compactarse el material en obra.

Para el caso de nuestro suelo idealizado parcialmente saturado se encuentran presentes la fase sólida, las partículas, y la fase fluida constituida por agua y aire. Se dispone en forma de anillos cónicos aislados alrededor de cada contacto.

La figura 2.1, muestra un sistema ideal, constituido por esferas rígidas de igual tamaño en arreglo cúbico. En este estado, cada esfera tiene contacto con otras seis resultando el estado más suelto. Este suelo ideal es capaz de retener una cierta cantidad de agua, que no drena por acción gravitacional. Se dispone en forma de anillos cónicos aislados alrededor de cada contacto.

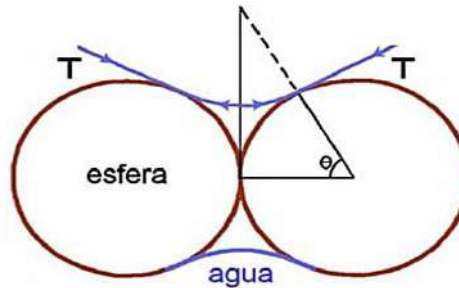
Figura 2.1. Muestra un sistema ideal, constituido por esferas rígidas de igual tamaño en arreglo cúbico.



Fuente: <http://es.slideshare.net/angeldsoloyo/a1-compactación-desuelos>

Ello determina el desarrollo de tensión superficial, tal como se muestra en la figura siguiente. La fuerza T que actúa en dirección tangencial a la superficie de tales anillos de agua, opera reteniéndola de la acción de la gravedad. Como consecuencia las esferas se mantienen unidas por este efecto, como si existiera una presión exterior. (Figura 2.2).

Figura 2.2 Cohesión entre partículas.



Fuente: [http://www.ityac.com.ar/Files/A1_Compactación de Suelos.pdf](http://www.ityac.com.ar/Files/A1_Compactación_de_Suelos.pdf)

Una aproximación a este esquema se tiene en las arenas naturales de granulometría uniforme, parcialmente saturadas, donde se desarrolla una cohesión aparente dada por los anillos de agua.

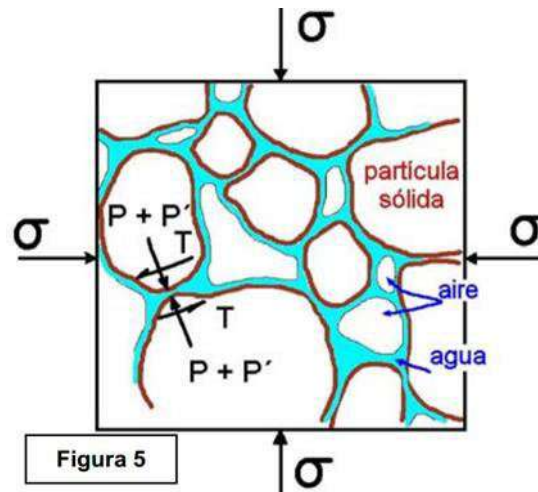
Por ejemplo un suelo granular, en la figura 2.3 siguiente se muestra un modelo simplificado de este tipo de suelo, el cual se presenta parcialmente saturado, y sometido a esfuerzos externos σ .

Como consecuencia de este proceso de carga, en los puntos de contacto entre partículas, quedan actuando cargas normales P y tangenciales T . El cociente entre T/P brindará un valor más o menos próximo al coeficiente de rozamiento entre partículas ϕ .

Cuando a este sistema se lo somete a un incremento de la carga exterior, aunque sea en forma isótropa, se producirá un incremento de la carga normal P' , pudiéndose señalar las siguientes situaciones:

- $(T/P+P') < \mu$ el sistema se encontrará en equilibrio.
- $(T/P+P') > \mu$ el sistema colapsará produciéndose movimientos relativos entre partículas, hasta que el acomodamiento genere nuevos puntos de contacto que reestablezca nuevamente el equilibrio.

Figura 2.3 Modelo simplificado de suelo granular parcialmente saturado, sometido a esfuerzos externos “ σ ”



Fuente: http://www.ityac.com.ar/Files/A1_Compactación_de_Suelos.pdf

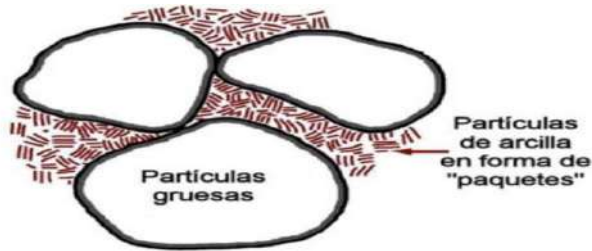
En el límite sin embargo, el agua llena los huecos, y la adición posterior de agua desplaza las partículas, dando lugar a una densidad seca más baja.

En cuanto a las arcillas resulta difícil representarlas de modo simplificado en un solo modelo, se puede considerar que está formada por partículas de arcilla agrupadas en “paquetes”, según puede apreciarse en la figura 2.4. Los granos de arena, limo y los “paquetes” de arcilla, se encuentran unidos entre sí y rodeados de agua en sus puntos de contacto. Las partículas de la fracción arcillosa tienen forma de láminas, con elevadas superficie específica y actividad superficial unitaria.

Dentro de ellos tienen lugar las siguientes fuerzas:

- La tensión superficial en la interface aire/agua dentro de la estructura del suelo.
- Las de interacción entre las partículas del suelo y las moléculas de agua.

Figura 2.4 En un Suelo Arcilloso se puede apreciar granos de arena, limo y los “paquetes” de arcilla

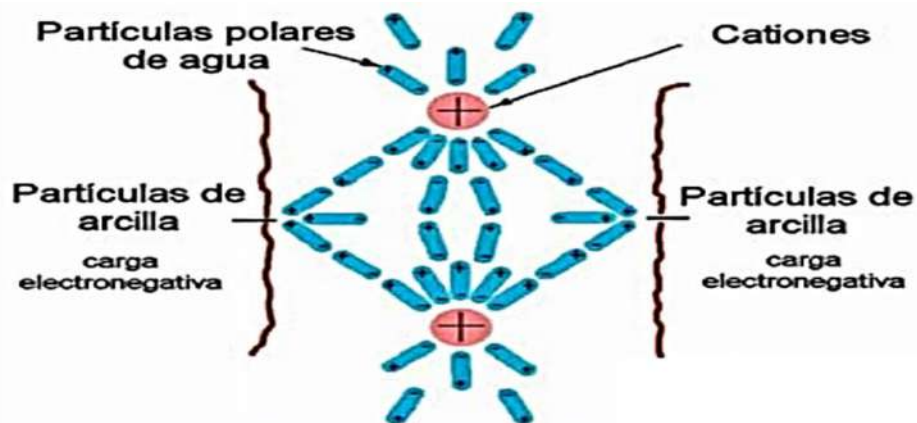


Fuente: http://www.ityac.com.ar/Files/A1_Compactación_de_Suelos.pdf

El agua de adsorción es un valor inherente a cada suelo cohesivo dependiendo del contenido y actividad de la fracción arcillosa, del índice de plasticidad y de la capacidad de intercambio de cationes.

Los iones presentes en el agua, actúan como agentes de enlace. En el agua hay iones cargados positivamente (cationes) como Na^+ , K^+ , Ca^{++} y Al^{+++} entre otros, en número suficiente para neutralizar las cargas negativas de las partículas del suelo, haciendo el sistema eléctricamente neutro. Tanto la actividad superficial como la presencia de tales iones, son responsables de los cambios volumétricos de los paquetes arcillosos ante un cambio del contenido de humedad, como se muestra en la siguiente figura 2.5.

Figura 2.5 Actividad superficial de las arcillas.



Fuente: http://www.ityac.com.ar/Files/A1_Compactación_de_Suelos.pdf



El agua se distribuye alrededor de cada contacto, que actúa como un lubricante entre partículas.

Alcanzado este efecto cuando se eleva la energía exterior aplicada, se obliga a las partículas a desplazarse hacia un empaquetamiento más cerrado, que conduce a una reducción de los poros y obliga al aire a drenar hacia el exterior. Este proceso ocurre en la medida que existan poros comunicados entre sí y con el exterior.

Ello se manifiesta en un corrimiento de la curva de compactación hacia una mayor densidad máxima y una menor humedad óptima¹⁵. Ello muestra que la disipación de la sobrepresión del aire es cada vez menor en estos suelos.

La reducción de porosidad y el incremento de la humedad, conducen a un estado límite en el que se forma una red continua de agua. Más allá de cierto contenido de humedad, el agua comienza a tener una continuidad que cierra los poros comunicados. Como consecuencia el aire queda encerrado en forma de burbujas aisladas. Éstas son retenidas en cada poro y no es posible lograr una mayor densificación en el suelo para un mismo trabajo mecánico.

A partir de este estado, hay un cambio de propiedades por la existencia de un componente perfectamente elástico (aire ocluido), dado que las burbujas solo pueden drenar junto con el agua deslizándose dentro del conjunto.

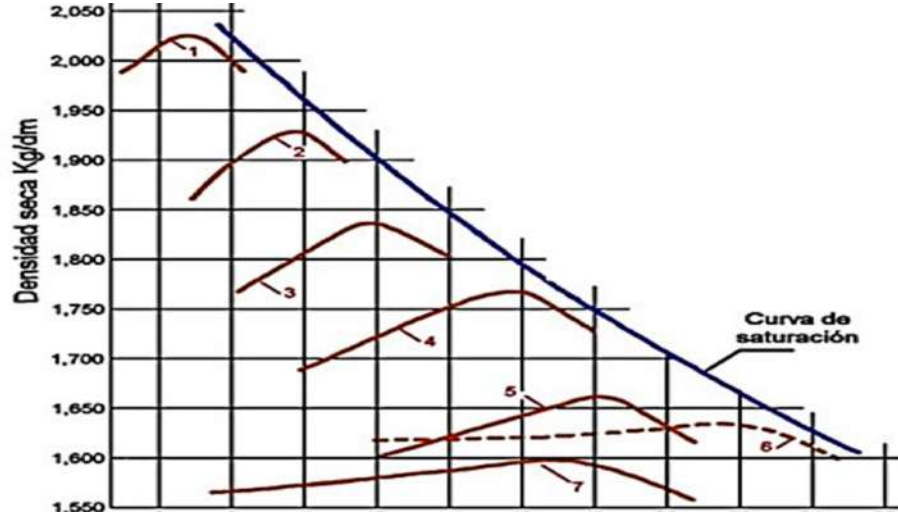
La zona húmeda comienza en el punto de máxima densidad de la curva. En él se dan las condiciones para que una proporción del aire pase al estado ocluido. En esta condición el aire se comporta como un material perfectamente elástico, lo que añadido al incremento de humedad se traduce en una separación de las partículas con una disminución de la densidad seca.

En esta parte de la curva, la interface curva agua/aire de las burbujas, se asimila a una membrana elástica en tensión.

¹⁵ Matilde González Caballero. El terreno. Primera edición Universidad Politécnica de Catalunya, 2001, E-mail: edicions-upc@upc.es. pág. 30.

En la figura 2.6 podemos observar las curvas típicas de compactación de diferentes tipos de suelos, observándose la citada curva de saturación teórica.

Figura 2.6 Curvas Típicas para Diferentes Tipos de Suelos.



Fuente: Carlos kraemer, José María Pardillo. Ingeniería de carreteras, Volumen II. McGRAW – HILL/interamericana. España, 2004. Pág. 60.

Puede apreciarse que para suelos con granulometría bien graduada, los valores de densidad máxima son elevados y las humedades óptimas relativamente bajas. En la siguiente tabla 2.3 se puede apreciar las características y plasticidad¹⁶.

Tabla 2.3 Características y plasticidad par diferentes tipos de suelos

Características y plasticidad de los suelos						
Nº	Descripción	Arena	Limo	Arcilla	L.L.	L.P.
1	Granular grueso bien graduado	68	10	2	16	NP
2	Granular medio bien graduado	78	15	13	16	NP
3	Granular medianamente graduado	73	9	18	22	4
4	Limo arenoso -arcilla	32	33	35	28	9
5	Limo arcilloso	5	64	31	36	15
6	Loess arenoso	5	85	10	26	2
7	Arcilla pesada	6	22	72	67	40
8	Arena mal graduada	94	6			NP

Fuente: Carlos kraemer, José María Pardillo. Ingeniería de carreteras, Volumen II. McGRAW – HILL. España, 2004. Pág. 60.

¹⁶ Carlos kraemer, José María Pardillo. Ingeniería de carreteras, Volumen II. McGRAW – HILL/interamericana. España, 2004. Pág. 60.



Se puede observar el efecto de tener una buena graduación en el material a compactar, en estos materiales, se obtiene mayor densificación con una misma energía, con el valor agregado de necesitar de una humedad menor.

En los suelos finos, las densidades secas máximas son tanto más elevadas cuando mejor graduada es su granulometría, sin exceso de arcilla. Las arenas limosas son en general las que dan densidades secas más elevadas, las arcillas puras por el contrario dan densidades secas relativamente bajas, con humedades óptimas más elevadas.

En el caso de las arenas uniformes, se obtienen densidades bajas y se evidencia una curva más achatada.

Las curvas Proctor de arcillas son con mucha frecuencia más aplastadas que las curvas de arenas y limos arenosos.

2.4.5.3 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios de las propiedades del suelo mediante el uso de agentes cementantes, ligantes asfálticos o humectantes para lograr una adecuada estabilidad.

Se define como la compactación o impermeabilización del suelo por la reacción o precipitación de sustancias químicas cuando están en contacto con el suelo. Se lleva a cabo sin sólidos en suspensión¹⁷.

Las sustancias químicas aplicadas al estar en contacto con el suelo se solidifican (catálisis química) y forman geles que actúan como ligantes a la fracción gruesa. Entre los elementos reaccionantes tenemos los silicatos de

¹⁷ Jonathan Q. Addo, PE. Thomas G. Sanders, Ph.D., PE. Melanie Chenard, E.I.T. La Supresión del Polvo de la Carretera: Desarrollo de la Estabilidad de mantenimiento, La seguridad y las Fases del Ambiente 1-3. USA. May 2004. Pág. 30.



sodio u otros silicatos solubles que activados con ácidos o sales metálicas, como acetato de etilo o cloruro de calcio, forman geles de sílice que al evacuar el agua se constituyen en sílices sólidos.

Otros geles duros solidifican de inmediato tales como los precipitados de silicatos de calcio y no permiten ninguna manipulación. Estos tienen la función de estabilizar suelos agregándole mayor capacidad portante e impermeabilizándolos.

De las resinas sintéticas (caucho, urea, cromo lignina, los copolímeros de acetatos polivinílicos o la analina que es un derivado líquido del alquitrán de hulla). Las resinas sintéticas son en su mayoría viscosas y endurecen lentamente al polimerizarse hasta formar un sólido elástico (gel flexible o plástico).

- ✓ Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- ✓ Cemento Portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- ✓ Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- ✓ Cloruro de Sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- ✓ Cloruro de Calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- ✓ Escorias de Fundición: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- ✓ Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- ✓ Hule de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.



Los aditivos estabilizadores podríamos agruparlos de la siguiente forma:

Tabla 2.4 Clasificación de aditivos estabilizadores (según su origen)

Absorventes de agua	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Cloruro de magnesio
Derivados del petróleo	Emulsiones Asfálticas Líquidos asfálticos Emulsiones de asfalto modificado
No derivados del petróleo	Grasa de animales Lignosulfatos Melaza-azúcar de beterraga Emulsiones de aceite de tallos Aceite vegetales
Electroquímicos	Enzimas Productos iónicos Aceite sulfonados
Polímeros sintéticos	Acetato polivinílico Vinil acrílico
Aditivos de arcilla	Bentonita Montmorillonita

Fuente: Fratelli, María Graciela. Suelos, Fundaciones y Muros. Pag.93. Venezuela, 1993.

2.5 ENSAYOS PARA CARACTERIZAR SUELOS PARA MUESTRAS ALTERADAS E INALTERADAS:

- Granulometría
- Límites de consistencia
- Humedad natural
- Clasificación de suelos
- Pesos específicos
- Porosidad
- Grado de saturación
- Relación de vacíos



2.5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS

Es la caracterización de los suelos de acuerdo a los diferentes tamaños de partículas que lo constituyen, el ensayo puede ser mediante el tamizado según especificaciones técnicas (MTC E 107) o por medio del hidrómetro (MTC E 109). A partir de la cual se puede estimar, con mayor o menor aproximación, las demás propiedades que pudieran interesar¹⁸.

Figura 2.7. Análisis Granulométrico por Tamizado



Fuente: http://delegacion.camino.upm.es/apuntes/CCP/4_cuarto/Geotecnia/MECÁNICA_DEL_SUELO-1.pdf

Del tamaño de partículas del suelo se define los siguientes términos:

Tabla 2.5 Clasificación de suelos según tamaño de Partículas

Tipo de Material		Tamaño de las partículas
Grava		75 mm – 4.75 mm
Arena		Arena gruesa: 4.75 mm – 2.00 mm
		Arena media: 2.00 mm – 0.425mm
		Arena fina: 0.425 mm – 0.075 mm
Material Fino	Limo	0.075 mm – 0.005 mm
	Arcilla	Menor a 0.005 mm

Fuente: Manual de Carreteras: “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”
Sección: Suelos y Pavimentos, pág. 36.

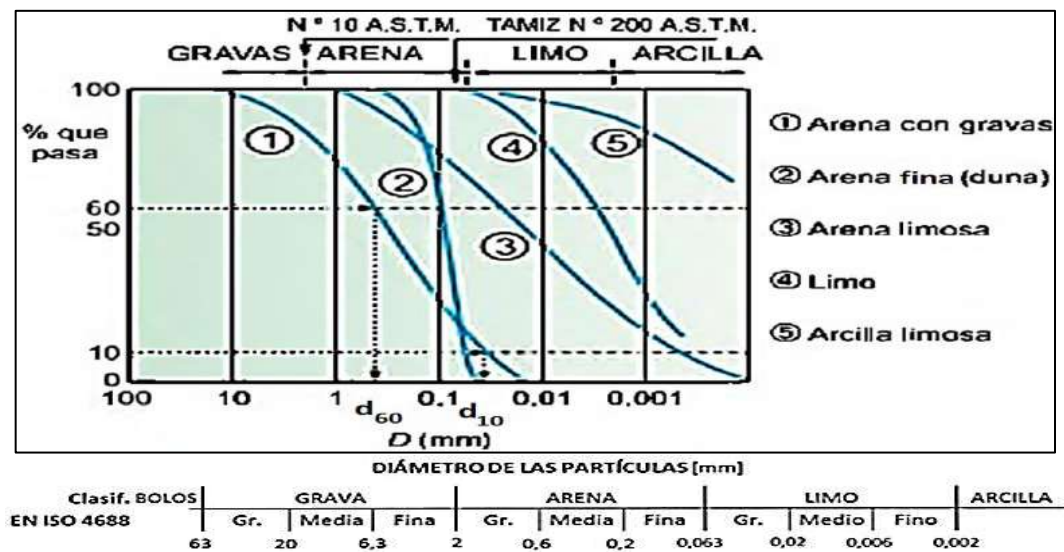
¹⁸ Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos, MTC, Perú - 2013.

Se separan los suelos finos y gruesos que pasan por diferentes tamices de ‘x’ micrones dispuestos en serie y son retenidos los más gruesos.

También se observa la textura a través de la apariencia visual del suelo basada en la composición cualitativa de los tamaños de los granos del suelo.

El análisis granulométrico es una gráfica de porcentaje pasante de suelo respecto al tamaño de partícula llamado curva de distribución granulométrica.

Figura 2.8 Granulometría de partículas.



Fuente: Luis I. González de Vallejo, Mercedes Ferrer, INGENIERÍA GEOLÓGICA, Madrid, 2002, Pág. 22.

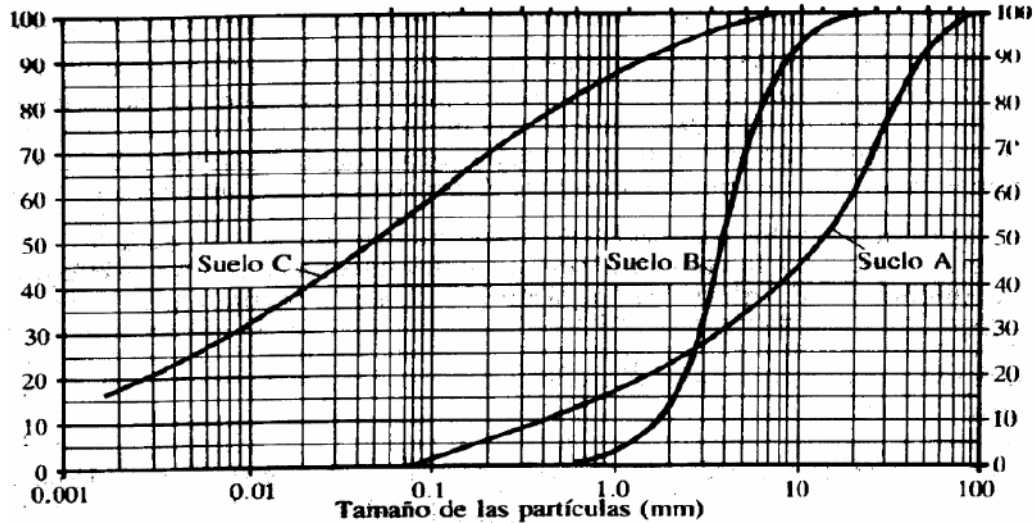
TIPO DE SUELO

Suelo no cohesivo, son suelos compuestos de; rocas, piedras, gravas y arenas, o suelos de granos gruesos. En los suelos granulares el proceso de compactación más adecuado resulta el de la vibración, pero debe tenerse en cuenta, que el comportamiento de los suelos gruesos depende mucho de la granulometría¹⁹. Así, por ejemplo, en la figura 2.9 Se indican curvas, una correspondiente a un suelo bien graduado y otra a un suelo mal graduado.

¹⁹ Carlos kraemer, José María Pardillo. Ingeniería de carreteras, Volumen II. McGRAW – HILL/interamericana. España, 2004. Pág. 60.



Figura 2.9 Interpretación de la curva granulométrica



Fuente: Gonzalo Duque E. y Carlos Enrique E. Potes Manizales, MECÁNICA DE LOS SUELOS, 2002, Pág.29

- La curva A: Suelo bien graduado y de grano grueso.
- La curva B: mal graduado, poco uniforme (curva parada sin extensión)
- La curva C: Suelo arcilloso o limoso (fino)

Interpretación de los resultados:

Si estudiamos la regularidad de la curva podremos diferenciar dos tipos de granulometría.

- Granulometría discontinua:** La curva presenta picos y tramos planos, que indican que varios tamices sucesivos no retienen material, lo que evidencia la variación de tamaños es escasa. En este caso, se habla de **suelos mal graduados**. La arena de playa es un claro ejemplo de este tipo de suelos.
- Granulometría continua:** En el tamizado la totalidad de los tamices retienen material, por lo que la curva adopta una disposición suave y continua. A este tipo de suelo se les denomina **suelos bien graduados**. Las zahorras (lastre) se engloba dentro de este grupo.

Coefficiente de curvatura:

Ayuda en la interpretación de cómo está graduado un suelo, dando información sobre el equilibrio entre los diversos tamaños²⁰.

²⁰ Joseph E. Bowles. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil.. Ed. Mc Graw Hill, Usa – 1982.



De cara a determinar numéricamente la graduación de un suelo se emplea el coeficiente de curvatura, definido con la siguiente expresión:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (2.4)$$

Donde D_x es la abertura del tamiz o diámetro efectivo (mm) por donde pasa el X por ciento en peso de la totalidad de la muestra de suelo analizada.

En carreteras, es importante que el suelo este bien graduado para que al compactarlo, las partículas más finas ocupen los huecos que dejan los áridos de mayor tamaño, reduciendo de esta forma el número de huecos y alcanzando una mayor estabilidad y capacidad portante. Un suelo bien graduado presenta valores de C_c comprendidos entre 1 y 3.

Coefficiente de uniformidad²¹.

Otro parámetro muy empleado para dar la idea de grado de uniformidad, de un suelo es el llamado **coeficiente de uniformidad**, definido por Hasen como la relación entre las aberturas de tamices por donde pasan el 60% y el 10% en peso de la totalidad de la muestra analizada con la siguiente expresión:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.5)$$

Sirve para medir y calificar el grado de distribución de tamaños de las partículas de un suelo. Por ejemplo, si todas las partículas son muy similares en tamaño, D_{60} y D_{10} no diferirán mucho, el coeficiente C_u será pequeño y el suelo se dice que es “uniforme” o “mal graduado”.

Por el contrario, si el suelo tiene abundancia de tamaños intermedios entre el máximo y el mínimo, D_{60} y D_{10} diferirán sustancialmente, el coeficiente C_u será grande y el suelo se dice que está “bien graduado”.

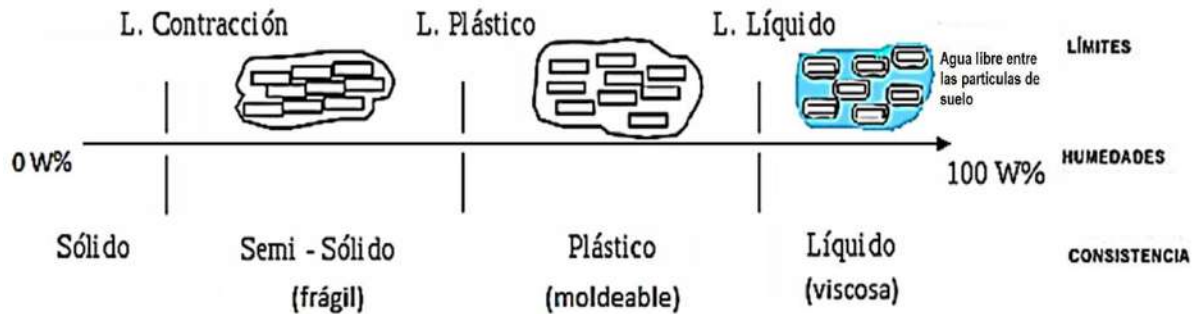
Según este coeficiente, un suelo que arroje valores inferiores a 2 se considera muy uniforme, mientras que un coeficiente inferior a 5 define un suelo uniforme.

²¹ Joseph E. Bowles. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil.. Ed. Mc Graw Hill, Usa – 1982.

2.5.2 PLASTICIDAD DE LOS SUELOS - LÍMITES DE ATTERBERG

Los límites de consistencia o Límites de Atterberg, establecen cuán sensible es el comportamiento de un suelo en relación con su contenido de humedad, en el que el suelo puede adquirir consistencias indeseables; mostrada en la figura 2.10: Límite Plástico o Inferior, el suelo se moldea fácilmente por la acción de una fuerza; y Límite Líquido o Superior, donde adquiere un comportamiento de masa viscosa²².

Figura 2.10 Plasticidad del material – límites de Atterberg.



Fuente: Elaboración propia.

La plasticidad de un suelo, no depende de los elementos gruesos que contiene, sino únicamente de sus elementos finos.

Los límites de Atterberg se pueden utilizar para distinguir entre el limo y arcilla, y los diferentes tipos de estos. De acuerdo al contenido crítico de agua de los finos de un suelo se tienen el límite líquido (MTC E 110), el límite plástico (MTC E 111) y el límite de contracción.

2.5.2.1 LÍMITE LÍQUIDO (LL)

Es el contenido de agua en el que el comportamiento de un suelo arcilloso cambia de plástico a líquido esto es cuando el suelo pasa del estado

²² Carlos Crespo Villalaz. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa, México – 1979. Pág. 30.



semilíquido a un estado plástico y puede moldearse. El ensayo para determinar el límite se encuentra en la MTC E 110 (ASTM D 4318).

En este límite el contenido de humedad (W) en la película de agua se hace tan gruesa que la cohesión decrece y la masa de suelo fluye por acción de la gravedad. En el ensayo se realizó una pasta de suelo – agua; que luego se colocó en la cazuela y se realizó una ranura con una espátula trapezoidal para hacer una ranura por medio en dos golpear hasta que a los 20 – 25 golpes.

Índice de Plasticidad: Es un parámetro físico que se relaciona con la facilidad de manejo del suelo, por una parte, y con el contenido y tipo de arcilla presente en el suelo, por otra: Se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico:

$IP = LL - LP > 10$ plástico.

$IP = LL - LP < 10$ no plástico.

Valores Menores de 10 indican baja plasticidad, y valores cercanos a los 20 señalan suelos muy plásticos. En la figura 2.11 se muestra el equipo de casa grande.

Figura 2.11 Ensayo de límite líquido - Cuchara de casa grande y acanaladores.

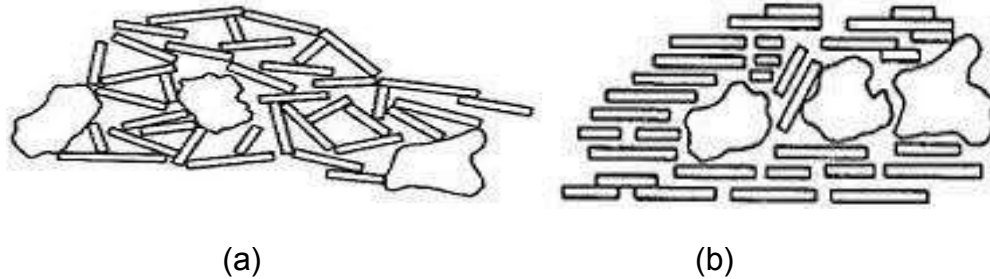


Fuente: Luis González de Vallejo, Mercedes Ferrer, Ingeniería Geológica, Madrid, 2002, Pág. 23.



La transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remoldeado o amasado. En las figuras 2.12, a continuación podemos observar un esquema hipotético del estado de un suelo antes y después del ensayo de límites de Atterberg:

Figura 2.12: (a) Estructura del Suelo Inalterado, (b) Estructura del Suelo Remoldeado o Amasado



Fuente: Gonzalo Duque E. y Carlos Enrique E. Potes Manizales, MECÁNICA DE LOS SUELOS, 2002, Pág.20

2.5.2.2 LÍMITE PLÁSTICO (LP)

Es el contenido de humedad, donde el cilindro se rompe en un diámetro de 3,2 mm (aproximadamente 1/8 de pulgada). A medida que el contenido de humedad cae debido a la evaporación, el cilindro comenzará a romperse y desmoronarse Considerando no plástico si el cilindro no se puede rodar a cabo hasta 3,2 mm en cualquier humedad. En el momento en que no se logre formar el cilindro se toma una porción a la cual se le determina el P_w . Este valor representa el contenido máximo de humedad que puede contener el suelo para pasar a una consistencia plástica²³. Esto sucede cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido. El ensayo para determinar el límite se encuentra en la MTC E 111 (ASTM D 4318).

Después fragmentar con una espátula, lo cual consiste en reunir los fragmentos y procedemos a determinar la cantidad de humedad a una temperatura de 105 °C Para evaporarse, es decir el cambio de consistencia de

²³ Carlos Crespo Villalaz. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa, México – 1979. Pág. 61.



disgregable a plástica. Luego se debe aplicar la siguiente fórmula (Ecuación de contenido de humedad):

$$PW = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times 100 \quad (2.6)$$

Dónde:

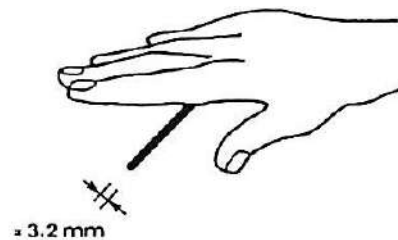
PW = Contenido de Humedad.

Psh = Peso de Suelo Húmedo.

Pss = Peso de Suelo Seco.

En la figura se muestra el ensayo de límite plástico:

Figura 2.13 Ensayo de Límite Plástico.



Fuente: http://1.bp.blogspot.com/_RfXS8XXEygw/TO5tEcEyzHI/AAAAAAAAAIE/YMbDxGgQ9r0/s1600/lp+proced.jpg

2.5.2.3 LÍMITE DE CONTRACCIÓN (LC)

Es el contenido de agua en la máxima pérdida de humedad, sin la reducción de volumen y se produce cuando el suelo pasa de un estado



semisólido a un estado sólido. El ensayo para determinar el límite se encuentra en la MTC E 112 (ASTM D 4943)²⁴.

2.5.2.4 DETERMINACION DEL INDICE DE PLASTICIDAD (IP)²⁵

La consistencia: es la característica física que gobierna las fuerzas de cohesión- adhesión, responsables de la resistencia del suelo a ser moldeado o roto. Dichas fuerzas dependen del contenido de humedades.

Se refiere a las fuerzas que permiten que las partículas se mantengan unidas; se puede definir como la resistencia que ofrece la masa de suelo a ser deformada o amasada. Las fuerzas que causan la consistencia son: cohesión y adhesión.

Cohesión: Esta fuerza es debida a atracción molecular en razón, a que las partículas de arcilla presentan carga superficial, por una parte y la atracción de masas por las fuerzas de Van der Waals²⁶, por otra (GAVANDE, 1976). Además de estas fuerzas, otros factores tales como compuestos orgánicos, carbonatos de calcio y óxidos de hierro y aluminio, son agentes que integran el mantenimiento conjunto de las partículas.

La cohesión, entonces es la atracción entre partículas de la misma naturaleza.

Adhesión: Se debe a la tensión superficial que se presenta entre las partículas de suelo y las moléculas de agua. Sin embargo, cuando el contenido de agua aumenta, excesivamente, la adhesión tiende a disminuir. El efecto de la adhesión es mantener unidas las partículas por lo cual depende de la proporción Agua/Aire.

²⁴ Carlos Crespo Villalaz. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa, México – 1979. Pág. 65.

²⁵ Carlos Crespo Villalaz. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa, México – 1979. Pág. 63.

²⁶ Fuerza de Van der Waals, fuerza intermolecular atractiva, pero poco intensa, que se ejerce a distancia entre moléculas. Son fuerzas de origen eléctrico que pueden tener lugar entre dipolos instantáneos o inducidos y entre dipolos permanentes. Microsoft® Encarta® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation.



De acuerdo a lo anteriormente expuesto se puede afirmar que la consistencia del suelo posee dos puntos máximos; uno cuando está en estado seco debido a cohesión y otro cuando esta húmedo, que depende de la adhesión.

Además del LL y del LP, una característica a obtener es el índice de plasticidad IP (MTC E 111) que se define como la diferencia entre LL y LP:

$$IP = LL - LP \quad (2.7)$$

Valores inferiores a 10 indican baja plasticidad, especialmente en el rango menor de 5; índices superiores a 10 y cercanos a 20 indican alta plasticidad (Malagon, 1983).

El índice de plasticidad indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica y permite clasificar bastante bien un suelo. Un IP grande corresponde a un suelo muy arcilloso; por el contrario, un IP pequeño es característico de un suelo poco arcilloso. En tal sentido, el suelo en relación a su índice de plasticidad puede clasificarse según lo siguiente:

Tabla 2.6 Clasificación de suelos según Índice de Plasticidad

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP > 7	Media	suelos arcillosos
IP < 7	Baja	suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No Plástico (NP)	suelos exentos de arcilla

Fuente: Manual de Carreteras: “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos, pág. 37.

Se debe tener en cuenta que, en un suelo el contenido de arcilla, de acuerdo a su magnitud puede ser un elemento riesgoso en un suelo de

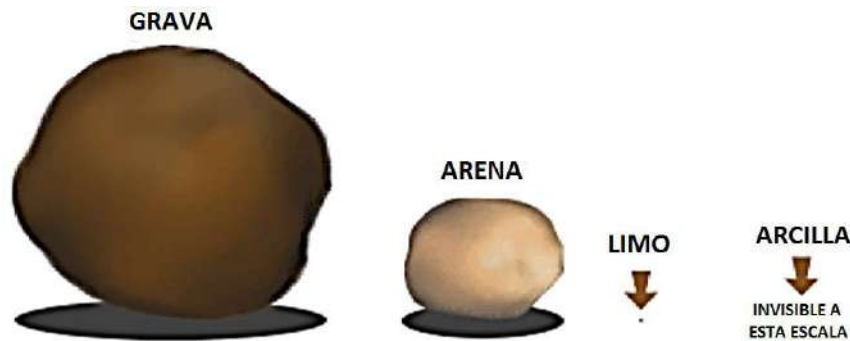


subrasante y en una estructura de pavimento, debido sobre todo a su gran sensibilidad al agua.

2.6 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS

Obviamente muchos suelos naturales no son simplemente una arena, una grava o una arcilla, sino que contienen partículas de diversos tamaños en proporciones variables como en la figura 2.14.

Figura 2.14 Proporciones de los diferentes tamaños de los suelos



Fuente: <http://delegacion.camino.upm.es/apuntes/ICCP/4 cuarto/Geotecnia/MECÁNICA DEL SUELO-1.pdf>

Suelo cohesivo, son suelos arcillosos y limosos o sea material de grano muy fino.

Suelos mixtos, los suelos están compuestos por una íntima mezcla de partículas de muchísimos tamaños.

2.7 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.

Sistema de clasificación de los suelos según AASHTO y SUCS²⁷. Ambos métodos basados en granulometría del suelo y de los límites de Atterberg.

Nota: La clasificación de suelos según la AASHTO se utiliza en vías, y la clasificación de suelos según SUCS se utiliza para cimentaciones.

²⁷ Carlos Crespo Villalaz. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa, México – 1979. Pág. 71.



2.7.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN AASHTO

Esta clasificación se basa en los resultados obtenidos como el límite líquido, índice de plasticidad y el análisis granulométrico del material que pasa el tamiz N° 10, 40 y 200²⁸. De acuerdo con este sistema los suelos están clasificados en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8. Los suelos inorgánicos se clasifican en siete grupos que van del A-1 al A-7 y los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8.

2.7.1.1 SUELOS GRANULARES:

Son aquellos que tienen el 35% o menos, del material fino que pasa por el tamiz N° 200, estos suelos forman los grupos A-1, A-2, A-3.

Grupo A-1: Son mezclas de suelos bien gradados, de fragmentos de piedra, grava, arena y material ligante poco plástico. Se incluyen también en este grupo mezclas bien gradadas que no tienen material ligante.

Subgrupo A-1a: Son materiales formados por roca o grava, con o sin material ligante.

Subgrupo A-1b: Son materiales formados por arena gruesa bien gradada, con o sin ligante.

Grupo A-2: Comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material fino, y que no pueden ser clasificados como A-1 y A-3. El grupo A-2 se subdividen en A-2-4, A-2-5, A-2-6 y A-2-7.

Grupo A-3: En este grupo se encuentran incluidas las arenas finas de playa y aquellas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad.

²⁸ Joseph E. Bowles. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. Ed. Mc Graw Hill, Usa – 1982. Pag.69.



2.7.1.2 SUELOS FINOS:

Son suelos limo-arcillosos que tienen más del 35% que pasa el tamiz N° 200. A este tipo de suelos les corresponde los grupos A-4, A-5, A-6, A-7.

Grupo A-4: Son suelos limosos poco o nada plásticos, que tiene un 75% o más del material fino que pasa el tamiz N° 200. Además se incluyen en este grupo las mezclas de limo con grava y arena en un 64%.

Grupo A-5: Son suelos semejantes al grupo A-4, son elásticos y tienen un límite líquido elevado.

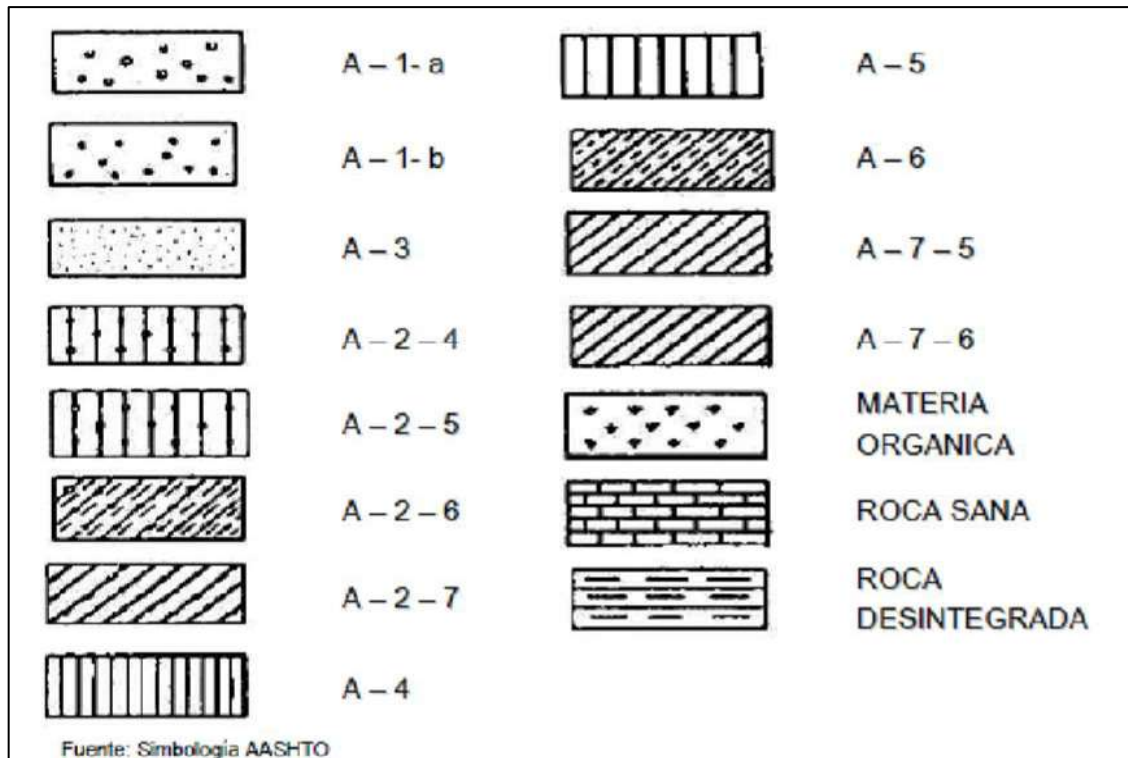
Grupo A-6: A este grupo pertenecen las arcillas plásticas. Por lo menos el 75% de estos suelos deben pasar el tamiz N° 200, pero se incluyen también las mezclas arcillo - arenosas, cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%.

Grupo A-7: Los suelos de este grupo son semejantes a los suelos A-6, pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados, y se subdividen en A-7-5 y A-7-6.

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5, es igual o menor a $LL = 30$, y el índice de plasticidad del subgrupo A-7-6, es mayor que $LL = 30$.

Los suelos encontrados serán descritos y clasificados de acuerdo a la metodología para construcción de vías, la clasificación se efectuará obligatoriamente por AASHTO y SUCS, se utilizarán los signos convencionales de las figuras 2.15 y 2.16:

Figura 2.15 Signos Convencionales para Perfil de Calicatas (Clasificación AASHTO)



Fuente: Manual de Carreteras: “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”
Sección: Suelos y Pavimentos, pág. 35

La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se hace por medio del “índice de grupo”, mismo que se calcula con la siguiente fórmula empírica.

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10) \quad (2.8)$$

Dónde:

F = porcentaje de material que pasa el tamiz de 0.075mm (N° 200), expresado como un número entero.

LL =límite líquido.

IP = índice de plasticidad.



2.7.2 CLASIFICACIÓN UNIFICADA DE SUELOS (SUCS)

Sistema para la identificación de los suelos, los agrupa de acuerdo a su comportamiento como material para construcción en función de sus propiedades de granulometría y plasticidad.

El primer paso para clasificar el suelo consiste en identificar si es altamente orgánico o no. De serlo, se anota las principales características como: textura, olor, etc., y se identifica simplemente como turba y si no lo es, se continúa el proceso con ayuda de pruebas de laboratorio, indicando si el suelo es grueso o fino.

2.7.2.1 SUELOS GRUESOS:

Son aquellos suelos que más del 50% de las partículas son retenidas en el tamiz N° 200. Un suelo grueso será grava, si la mayor parte de la fracción gruesa queda retenida en el tamiz N° 4 y se considera como arena al porcentaje pasante.

2.7.2.2 SUELOS FINOS:

Son aquellos suelos que más del 50% de las partículas pasan el tamiz N° 200. Para distinguir si la fracción fina es de carácter limoso o arcilloso, se emplea la figura 2.17, conocida como carta de plasticidad de casa grande.

Figura 2.16 Signos Convencionales para Perfil de Calicatas (Clasificación SUCS)

	GW	Gravas bien mezclada arena, grava con poco o nada de material fino, variación en tamaños granulares.		SM	Materiales finos sin plasticidad o con plasticidad muy baja.
	GP	Grava mal graduadas, mezcla de arena-grava con poco nada de material fino.		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena-arcillosa.
	GM	Gravas limosas mezclas de grava arena limosa.		ML	Limos orgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas o limos arcillosos con ligera plasticidad.
	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava-arena-arcilla gravas con material fino cantidad apreciable de material fino.		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja o mediana, arcillas gravas, arcillas arenosas, arenas limosas, arcillas magras.
	SW	Arena bien graduadas, arenas con grava, poco o nada de material fino. Arenas limpias poco o nada, amplia variación en tamaño granulares y cantidades de partículas en tamaño intermedias.		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas, baja plasticidad.
	SP	Arena mal graduadas con grava poco o nada de material fino. Un tamaño predominante o una serie de tamaños con ausencia de partículas internas.		MH	Limo inorgánicos suelos finos granosos o limosos, micáceos o diatomeláceos, limos elásticos.

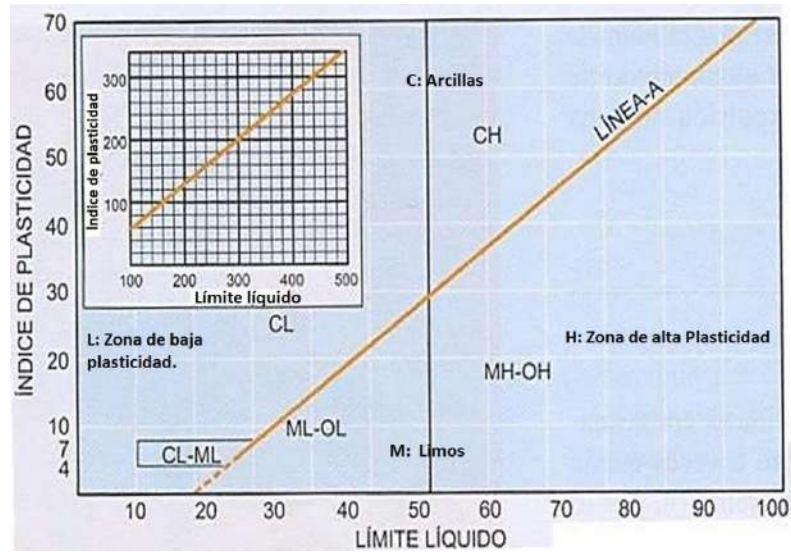
	CH	Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad, arcillas grasosas.
	OH	Arcillas orgánicas de mediana o elevada plasticidad, limos orgánicos.
	Pt	Turba, suelos considerablemente orgánicos.

Fuente: Manual de Carreteras: “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”
 Sección: Suelos y Pavimentos, pág. 35

En la figura 2.17 se muestra la carta de plasticidad para la clasificación SUCS.



Figura 2.17 Carta de plasticidad - clasificación unificada de suelos (sucs)



Fuente: Luis I. González de Vallejo, Mercedes Ferrer, INGENIERÍA GEOLÓGICA, Madrid, 2002, Pág. 24.

El sistema unificado utiliza símbolos para identificar los suelos y determinar su comportamiento como material de construcción. Las letras que se emplean para distinguir los suelos son:

- **G** - grava
- **S** - arena
- **M** - limo
- **W** - bien gradada
- **P** - pobremente gradada
- **C** - arcilla
- **O** - limos y arcillas orgánicas
- **L** - baja y media plasticidad
- **H** - alta plasticidad
- **Pt** - turbas o fangos

Las combinaciones de las letras antes mencionadas son las que permiten la clasificación del suelo. Por ejemplo SW designa una arena bien gradada.



2.8 COMPACTACIÓN DE SUELOS

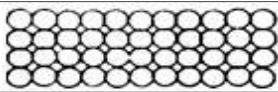
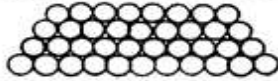
Es la densificación del suelo por medios mecánicos. El objetivo, es mejorar la resistencia y estabilidad volumétrica, afectando la permeabilidad, como consecuencia del proceso de densificación de la masa²⁹.

Es un proceso de la disminución o minimización de espacios vacíos por medio de la acción mecánica de los equipos de compactación.

Al compactar un suelo se persigue lo siguiente y en la figura 2.18:

- (a) disminuir futuros asentamientos
- (b) aumentar la resistencia al corte
- (c) disminuir la permeabilidad

Figura 2.18 Ejemplo de una compactación de un conjunto de esferas iguales.

	Estado <u>más suelto</u> . $\rho = 47,6\%$; $e = 0,91$
	Estado <u>más compacto</u> . $\rho = 26\%$; $e = 0,35$

Fuente: Juárez Badillo Y Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos, Tomo I. México 1976. Pag.79.

Por lo que con la compactación de un suelo se busca:

I.- Mayor capacidad de carga.- Al compactar un suelo se obtiene mayor densidad del mismo, debido a lo anterior se obtiene una mejor distribución de fuerzas que actúan directamente sobre el suelo como consecuencia de la carga que transmite la carga, lo que nos da una mayor capacidad de carga.

II.- Mayor estabilidad.- Al construirse alguna edificación sobre un suelo sin compactar o compactado en forma desigual, el suelo por la acción de la carga, se asienta en forma desigual, lo cual ocasionara grietas en la estructura, y en un momento dado la inestabilidad de la construcción.

²⁹ Juárez Badillo Y Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos Tomo I. México 2005. Pág. 575.



III.- Disminución de la contracción del suelo.- Al existir espacios de aire en el suelo, el agua penetra con facilidad, por lo que se produce un fenómeno de dilatación y contracción del suelo, el cual se separa de la estructura, modificando las condiciones iniciales de diseño.

IV.- Disminución de la permeabilidad.- La permeabilidad de un suelo depende de la granulometría del suelo y de su densidad, un suelo bien compactado impide el paso del agua, evitando así deformaciones en el suelo, modificando las características de diseño, como es el caso de los baches.

V.- Disminución de asentamiento.- Cuando un suelo está mal compactado, en esos espacios se puede llenar de agua, el cual con bajas temperaturas se congela, y en los cambios de estado puede producir agrietamiento en la estructura de los pavimentos, bases de estructuras, muros etc.

2.9 MEDIDA DE COMPACIDAD DEL SUELO

Se califica la compacidad por la comparación cuantitativa de las densidades secas o pesos unitarios secos, γ_d , que el suelo va adquiriendo gradualmente, al variar la humedad y la energía o el método de compactación.

2.10 MÉTODO DE LA COMPACTACIÓN PROCTOR

Consiste en compactar el material dentro de un molde metálico y cilíndrico, en varias capas y por la caída de un pistón³⁰.

La compactación de los suelos, es usado como medio para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos. Sin embargo, fue hasta 1933, año en el que Ralph R. Proctor publicó sus investigaciones, cuando se conocieron los factores que intervienen en la compactación. Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía para compactarlo, el peso volumétrico obtenido varía con el contenido de humedad según una curva, como la de la

³⁰ J. A. JIMENEZ SALAS, J. L. de JUSTO ALPAÑES. Geotecnia y Cimientos I, Propiedades de los suelos y de las rocas. Editorial Rueda, Madrid – 1975. 2da Edición. Pág. 30.

figura 2.19, en la cual se puede observar la existencia de un grado de humedad con el cual se obtiene el peso volumétrico máximo para ese suelo y esa energía de compactación.

Figura 2.19. Peso Volumétrico versus Contenido de Humedad A la abscisa y ordenada de ese punto máximo se les denomina humedad óptima, W_o , y peso volumétrico seco máximo. γ_{Max} respectivamente.



Fuente: Carlos Crespo Villalaz. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa, México 1979. Pág. 84.

Posteriormente, diversas organizaciones dedicadas a la construcción de terraplenes para diversos usos han establecido diferentes normas para ejecutar la prueba de compactación dinámica variando el número de golpes, el número de capas de suelo colocado en su interior, la altura de caída del pisón, etc. La introducción de tales modificaciones ha dado como resultado que se obtengan diferentes pesos volumétricos máximos y humedades óptimas, según la energía por unidad de volumen de suelo compactado empleada en cada norma. Esto ha sido consecuencia del mejoramiento en el equipo de compactación actualmente en uso con relación al de hace años.

En términos generales, al aumentar la energía de compactación para un mismo suelo aumenta su peso volumétrico seco máximo y disminuye su humedad óptima. Así pues, siempre que se trate de peso volumétrico seco

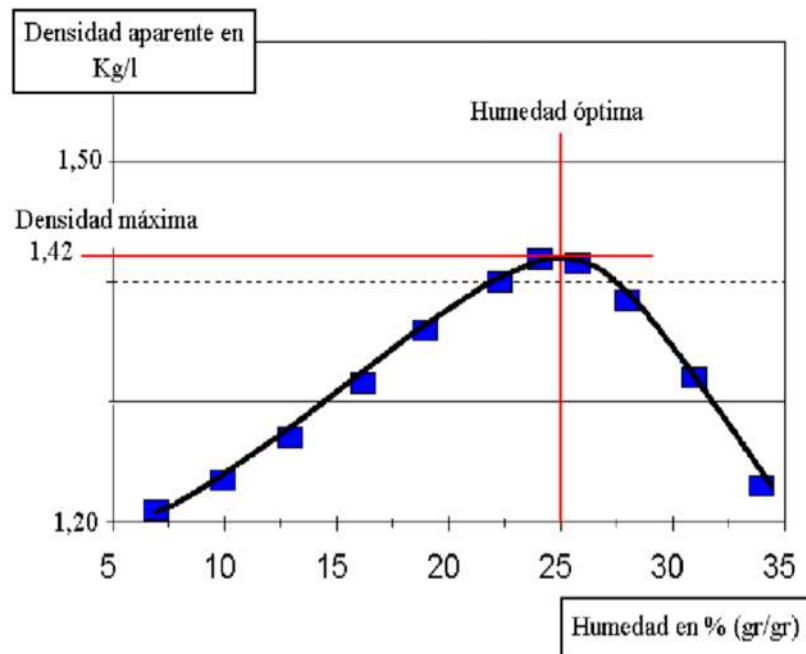


máximo y humedad óptima, es necesario especificar el estándar de comparación empleado³¹.

Curva de humedad – densidad de compactación se muestra en la figura 2.20: Esta curva da la variación, γ_d Vs ω , que se obtiene en laboratorio. La densidad seca (γ_d) va variando al modificar la humedad (ω), de compactación. La humedad óptima es la que se corresponde con el máximo de la curva de densidad.

La muestra seca es el que corresponde al suelo con baja de humedad, donde la fricción y cohesión ya dificultan su densificación. La muestra húmeda, es asintótica a la línea de saturación, que se desplaza hacia la óptima de compactación, dado que la energía de compactación de un suelo muy húmedo la absorbe el agua y no el esqueleto mineral.

Figura 2.20. Relación entre humedad y densidad aparente máxima
La Compactación (Ralph R. Proctor)



Fuente: www.rafaela.inta.gov.ar

³¹ Carlos Crespo Villalaz. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa, México – 1979. Pág. 85.



Variaciones del método PROCTOR:

- I. **Proctor estándar o normal**, con pistón de 5 ½ lbs, h = 12”, N = 25 golpes y 3 capas a compactar. El molde de $\phi = 4$ ” y volumen 1/30 ft³.
- II. **Proctor modificado**, con pistón de 10 lbs, h = 18”, N = 25 golpes, y compactando en 5 capas, con el mismo molde.
- III. La AASHTO (departamento de carreteras de USA), tiene dos normas:
La T99 para el Proctor estándar que exige $E_e = 6,03 \text{ Kg/cm}^2$ y la T180 y para Proctor modificado, con $E_e = 27,4 \text{ Kg/cm}^2$. Ambas normas aplicables a materiales, Pasa tamiz #4.

Energía de compactación. La calidad de la compactación depende del Contenido de humedad, método de compactación y energía de compactación. En el ensayo Proctor, la energía específica E_e , está dada por:

$$E_e = \frac{NnWh}{V} \quad (2.9)$$

- E_e : Energía Especifica o Energía de Compactación
 N : Número de golpes del pisón por cada capa
 n : Número de capas
 W : Peso de pisón compactador
 H : Altura de caída del pisón
 V : Volumen total del molde de compactación

Variables del proceso:

Son 3: Suelo, método y energía:

- 1) Suelo: Puede ser granular (friccionante) o fino (cohesivo)
- 2) Método de compactación: En campo (rodillos); en laboratorio (varios).



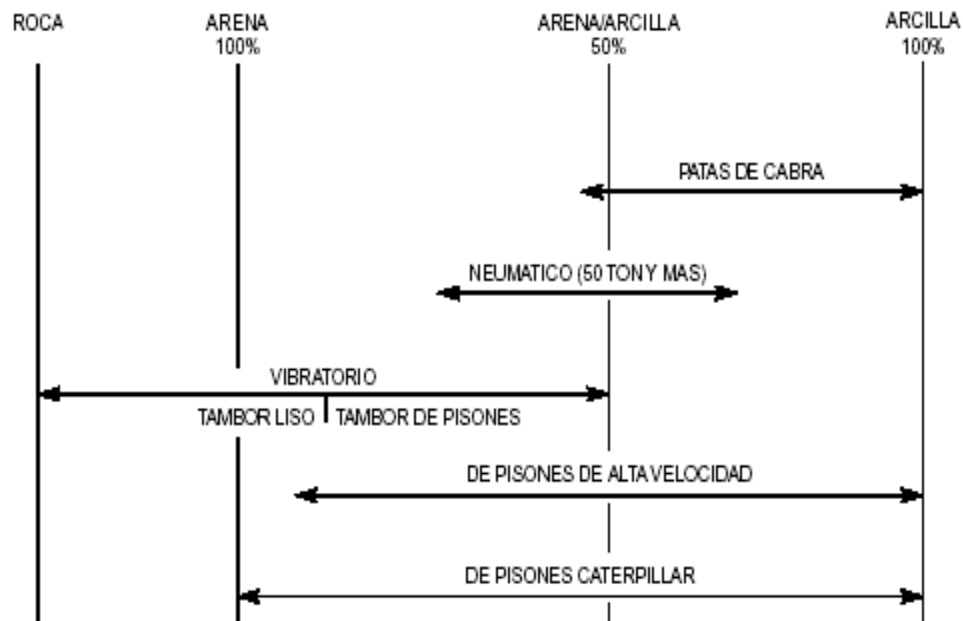
3) Energía: Energía específica, temperatura y humedad.

2.11 EQUIPO DE COMPACTACIÓN EMPLEADO:

- Aplanadoras de rodillo liso de acero
- Compactadores con neumáticos
- Compactadores de rodillo de pata de cabra
- Compactadores vibratorios
- Compactadores de placa vibratoria
- Apisonadoras de impacto

Los rodillos pueden ser vibratorios y los sistemas suelen hacerse mixtos. Se pueden usar ranas o canguros (vibrocompactadores), en áreas pequeñas. Por lo general las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc.

2.21 Equipo de compactación adecuado según el tipo de suelo.



Fuente: http://m.exam-10.com/pars_docs/refs/20/19805/19805_html_m4482586.png



2.12 COHESIÓN (C)

La cohesión es la fuerza que existe entre las partículas de suelo entre sí, esta es originada por la fuerza entre las películas de agua que se forman en el suelo. Al cambiar el contenido de humedad la cohesión del suelo podría variar. La cohesión es medida en unidades de fuerza sobre área. Los suelos con contenidos arcillosos tienen cohesión alta de 0,25 kg/cm² a 1,5kg/cm², o más. Los suelos limosos tienen muy poca, y en las arenas la cohesión es prácticamente nula.

Para entender mejor el término cohesión, hay que tener presente que se entiende por fuerzas moleculares o atracción molecular. La superficie específica se define como el área por unidad de volumen, su comportamiento estará regido por fuerzas superficiales o por fuerzas asociadas a su masa y forma. Todas las partículas del suelo poseen una carga eléctrica, la parte más fina está cargada negativamente, de acuerdo al tipo de material y de su superficie específica se asocia directamente la magnitud de dicha carga. La magnitud del área por unidad de masa, superficie específica, resulta por tanto una buena indicación de la influencia relativa de las cargas eléctricas sobre el comportamiento de la partícula, cuando el comportamiento de una partícula de suelo se asocia a las fuerzas superficiales se emplea el término Coloide, una partícula de arcilla es un coloide debido a su pequeño tamaño y forma irregular. Cuanto más pequeña una partícula, mayor es su superficie específica. Se ha definido un límite inferior en el valor de superficie específica para identificar la parte coloidal de una masa de suelo (25 m²/g), es en esta parte del suelo donde la cohesión actúa y toma importancia. (T. William Lambe & Robert V. Whitman).

También existen fuerzas de atracción que están presentes debido a la naturaleza misma de la partícula y su composición mineral, se denominan



fuerzas de Van der Waals las cuales difieren de las fuerzas electrostáticas y de los enlaces covalentes.

2.13 LOS PLÁSTICOS

El plástico es una sustancia de similares estructuras que carecen de un punto fijo de evaporación, durante un intervalo de temperaturas y poseen propiedades de elasticidad y flexibilidad, que permiten moldearlas y adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones, obtenidos mediante fenómenos de polimerización o multiplicación semi-natural de los átomos de carbono en las largas cadenas moleculares de compuestos orgánicos derivados del petróleo y otras sustancias naturales³².

El PET es usado para fabricar botellas de gaseosas, aguas, salsas, jugos, cervezas, películas, fibras, láminas, termoformados, etc.

Los plásticos se caracterizan por tener una alta relación resistencia/densidad, propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes.

Los plásticos se pueden dividir y clasificar de acuerdo a la estructura molecular. Las enormes moléculas de peso molecular alto, de las que están compuestos pueden ser: Las moléculas lineales y ramificadas, son **Termoplásticas** (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son **Termoendurecibles** (se endurecen con el calor, termoestables).

Las propiedades físicas y estructura molecular pueden cambiar dependiendo de la estructura que forma el carbono al asociarse con **hidrógeno, oxígeno y nitrógeno**.

³² Arturo Cristán Frías, et al <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetitas/422/envases.html>. Consulta: 30 Abril 2006



Los plásticos requieren un menor consumo energético durante su transformación porque se procesan a temperaturas de operación más bajas”.

En general los desperdicios de plásticos están básicamente formados por:

- Polietileno de Baja Densidad (PEBD)
- Polietileno de Alta Densidad (PEAD)
- Policloruro de Vinilo (PVC)
- Polipropileno (PP)
- Poliestireno (PS)
- Polietileno Tereftalato (PET).

Dentro de la gran variedad de resinas termoplásticas, apenas seis representan el 90% del consumo: PEBD (polietileno de baja densidad), PEAD (polietileno de alta densidad), PP (polipropileno), PS (poliestireno), PVC (polivinilcloruro), y PET (polietileno Tereftalato).

2.14 POLIETILENO TEREFTALATO (PET)

El PET es uno de los materiales comúnmente utilizados en la industria embotelladora de bebidas. Tarda 150 años o más en descomponerse. El PET, una vez reciclado, se puede utilizar en muebles, alfombras, fibras textiles, piezas de automóvil y envases de alimentos³³.

En 1996, según datos del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el 4% de la producción de petróleo bruto se destinaba a la fabricación de plástico. Se realizó una estimación en donde se identificó que se requiere de 18.7 toneladas de petróleo para fabricar 3.74 toneladas de plástico.

³³ José M Arandes1, et al (Marzo 2004) " reciclado de residuos plásticos". Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 5(1)



2.15 SITUACIÓN ACTUAL DEL PET EN EL PERÚ

En los últimos años, la producción de productos plásticos ha experimentado un crecimiento relativamente importante, con tasas por encima del 5% (en el año 2000 creció al 6,6%) que ha estado impulsada por la demanda interna.

La producción nacional de productos de plásticos registró un comportamiento fluctuante, con crecimientos significativos en el 2007 (10,9%) y 2010 (19,1%). A noviembre de 2013, la industria de plásticos ha registrado un incremento de 7,6%, asociado al mayor consumo de polietileno, poliestireno y plastificantes.

De acuerdo a la información publicada por el Ministerio de la Producción, la actividad productiva se concentra principalmente en la elaboración de envases PET; seguido por el policloruro de vinilo y en menor proporción por el polietileno y polipropileno.

Tabla 2.7 Consumo de los principales insumos para la industria de productos plásticos

CIIU División Grupo	Producto	Unidad de Medida	2007	2008 P/	2009 P/	2010 P/	2011 P/	2012 P/
252	Fabricación de productos de plástico							
	Polietileno	kg	33 990 118	36 653 816	34 949 014	42 688 122	46 939 342	38 682 651
	Poliestireno	kg	1 491 880	1 827 729	904 333	1 083 704	1 310 017	1 088 827
	Polipropileno	kg	43 502 412	46 589 023	37 151 825	40 956 920	42 196 003	40 954 010
	P.V.C.	kg	42 600 199	50 379 510	50 714 240	69 437 690	69 919 305	77 955 797
	Plastificantes D.O.P.	kg	2 455 645	2 575 084	2 478 429	3 016 367	3 221 832	2 884 154
	Masterbatch	kg	933 325	1 128 175	1 193 546	1 465 875	1 210 183	1 086 369
	Resina Pet para envases	kg	76 296 977	77 880 668	78 815 112	84 830 154	87 963 681	89 928 293

Fuente: Ministerio de la Producción - Viceministerio de MYPE e Industria.

2.16 RECICLAJE DE PLÁSTICOS EN EL PERÚ

En los últimos 25 años en el Perú, Al no existir en el Perú un control del medio ambiente, se ha permitido que surjan 500 compañías dedicadas al



proceso del reciclaje plástico cuyo interés tiene más propósitos económicos que de carácter ambientalista. De estas 500 compañías, el 75% se dedican al molido de plásticos y el otro 25% utilizan ésta materia prima para la fabricación de productos finales como son: baldes, galoneras, tuberías, calzado, etc.

De los reporte de aduanas del 97 para poder determinar aproximadamente la cantidad de materiales plásticos que estarían siendo reciclados en el Perú. Este reporte nos muestra que la importación de resinas y productos plásticos fueron de 250,832 toneladas métricas para el año 97 y que con la actual tecnología se podría, a nivel nacional obtenerse 42,601 toneladas métricas para su reciclaje. Trabajo presentado en "International Workshop on Environmentally Degradable and Recyclable Polymers in Latin American (WEDPLA) (15-20 November 1998) Campiñas - Brasil.

El proceso de reciclaje de PET, es el siguiente:

1. Consumo.
2. Separación.
3. Acopio y prensado.
4. Lavado y molido.
5. Granulado.
6. Transformación.

Los polímeros son codificados internacionalmente, para ser identificados y determinar las diferentes resinas plásticas presentes en los envases y facilitar su proceso de reciclaje, para poder transformarlos en artículos para otras aplicaciones, en la tabla 2.8 se enumeran los diferentes tipos de plástico, su uso y su código.



Tabla 2.8 Códigos, propiedades y usos de la resina plástica (Tecnología de los Plásticos, 2011)

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

Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.pe/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html>

2.17 UTILIZACIÓN DEL PET EN LA INGENIERÍA CIVIL

Se han creado soluciones para la reutilización y reciclaje de los residuos de PET, son prácticas relacionadas, específicamente en la construcción³⁴.

2.17.1 VIVIENDAS

Se utiliza envases PET en la construcción de viviendas de bajo costo, es una solución útil para poblaciones en estado de pobreza. Es un sistema

³⁴ Tesis: Liliana Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. Pág. 23.



innovador obteniéndose estructuras resistentes, duraderas, económicas y evitando a la vez la contaminación que se generan.

Figura 2.22 Arquitectura popular construcción con PET



FUENTE: <http://icasasecologicas.com/15-fotos-de-casas-hechas-con-botellas/>

2.17.2 CONCRETO POLIMÉRICO PET

Es el concreto polimérico de botellas de PET (CP-PET). Este cemento de desechos sólidos a un costo muy bajo, puede utilizarse en la construcción, su densidad es menor que los concretos convencionales, lo que provoca que la mezcla sea liviana, propiedad que la hace la estructura soporte bajas cargas.

2.17.3 LADRILLOS

El Centro Experimental de la CEVE, en Argentina, que se dedica a investigar y desarrollar modelos de casas con ladrillos y paneles hechos mediante el reciclado del PET es utilizado como reemplazo de la arena en la creación del concreto que se mezclan con cemento Portland y su uso es en mamposterías de elevación.



Figura 2.23 Ladrillo hechos con la trituration del PET



Fuente: <http://vilssa.com/ladrillos-de-plastico-reciclado>

2.17.4 PANELES

Las cáscaras de cacahuates, combinadas con resina poliéster obtenida del reciclaje de envases de PET, brindan una alternativa para fabricar paneles livianos y aislantes, para cielorrasos, de muy buena resistencia, bajo peso, y acabado atractivo para la arquitectura sustentable.

Figura: 2.24 Paneles con materiales de PET



Fuente: <http://www.universoarquitectura.com/la-arquitectura-sustentable-y-los-nuevos-materiales/>



Figura: 2.25 Paneles de cáscaras de cacahuate y PET



Fuente: http://archivo.lavoz.com.ar/nota.asp?nota_id=162789

Figura: 2.26 Paneles de plástico reciclado PET



Fuente: <http://mariosergioramirezablah.mx/ramirez-zablah-sustentabilidad/>

2.18 EL USO DE LOS GEOSINTÉTICOS EN LA MECÁNICA DE SUELOS

Los Geosintéticos son materiales flexibles desarrollados para complementar las falencias de los materiales térreos y mejorar el desempeño de los materiales de los trabajos en la construcción de obras, en difíciles condiciones y de manera económica, su uso está más extendido hacia el mejoramiento de los suelos, de infraestructura de transporte, obras geotécnicas (refuerzo de taludes), hidráulicas (drenaje y filtración), etc.



2.19 TIPOS DE GEOSINTÉTICOS Y SUS APLICACIONES

La International Geosynthetic Society (IGS)³⁵ los divide en 9 grupos:

1. Geotextiles
2. Geomembranas
3. Geomallas
4. Georedes
5. Geocompuestos
6. Geoceldas
7. Geotubos
8. Geobloques
9. Revestimientos geosintéticos de arcilla, GCL (Geosynthetic Clay Liners)

2.20 EMPLEO DEL PET EN LA GEOTECNIA

En el aspecto específico de la ingeniería geotécnica, el PET se emplea casi únicamente en la confección de geosintéticos, específicamente geotextiles y geomallas. En este campo, la utilización de PET reciclado es prácticamente baja, aunque algunas empresas luchan por aumentar dicha práctica.

Los polímeros más usados en la fabricación de geosintéticos en Estados Unidos de América son:

1. Polipropileno (PP) – 85%
2. Poliéster (PET) – 12%
3. Polietileno (PE) – 2%
4. Poliamida (Nylon) – 1%

La mayoría de los geotextiles son hechos de filamento de poliéster³⁶ (PET), polipropileno (PP), fibra de vidrio, fibra de basalto o fibras de carbono. Los usos

³⁵ Sociedad Internacional de Geosintéticos (IGS).

³⁶ El poliéster (C₁₀H₈O₄) es una categoría de polímeros del grupo funcional éster en su cadena principal son conocidos desde 1830, pero el término poliéster generalmente se refiere a los poliésteres sintéticos (plásticos), provenientes de fracciones pesadas del petróleo. El poliéster termoplástico más conocido es el PET.



típicos finales, incluyen aplicaciones en carreteras, diques, y terraplenes de ferrocarriles, entre otros.

En cuanto a las geomallas, que existe actualmente en el mercado es la geomalla de poliéster de alto módulo elástico, usado como elemento de refuerzo.

Estos materiales por su composición y fabricación poseen las siguientes características:

- Elevadas resistencias a tracción en rotura a corto plazo.
- Baja deformación en rotura.
- Excelente comportamiento a la fluencia.
- Interacción óptima con todo tipo de suelos gracias a su estructura.
- Fácil y rápida instalación
- Unión perfecta entre componentes evitando desgarros.
- Resistencia a largo plazo.
- Permeabilidad: capacidad de flujo de agua

Una de las empresas líderes en la utilización de PET reciclado para la fabricación de geosintéticos es ACE Geosynthetics Enterprise³⁷. Esta empresa no sólo proporciona una amplia gama de materiales geosintéticos, sino también participa activamente en los grupos de trabajo internacionales y comités de investigación.

³⁷ Enterprise Co., Ltd. se ha convertido en el principal proveedor de “Geomallas” y “Geotextiles” en Taiwán.



2.21 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL POLIETILENO TEREFTALATO (PET)

Químicamente el PET es un polímero termoplástico que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el monoetilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

Se compone de petróleo crudo, gas y aire. Según la Asociación Latinoamericana de la Industria Plástica, ALIPLAST, un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire.

En un estudio llevado a cabo por la Franklin Associates Limited, el resultado indica que el envase de PET requiere menos energía que la necesaria para la producción de envases de aluminio y de vidrio. Además se observó que el impacto ambiental de los envases de PET es menor.

Además, hay tres maneras de aprovechar los envases de PET una vez que termino su vida útil. Someterlos a un reciclado mecánico, a un reciclado químico o emplearlos como fuente de energía.

El **reciclado mecánico** es el sistema más utilizado. Los envases se muelen, lavan y secan para obtener un producto en forma de hojuelas que tiene diversas aplicaciones, para fabricar fibra textil para el envasado, rodillos para pintar, peluches, filtros, alfombras, fleje, telas no tejidas, termoformados, lámina acanalada y hasta prendas para vestir como camisetas.

Para el **reciclado químico** se han desarrollado distintos procesos, o a escala industrial. En cuanto a utilizar el PET reciclado como fuente de energía, pruebas de laboratorio y campo realizadas en conjunto con Ecoltec y Cementos Apasco, muestran que el PET puede ser usado como combustible debido a su poder calorífico de 5,373 kcal/kg y combustión eficiente.

2.22 PRODUCCIÓN DE LA RESINA PET

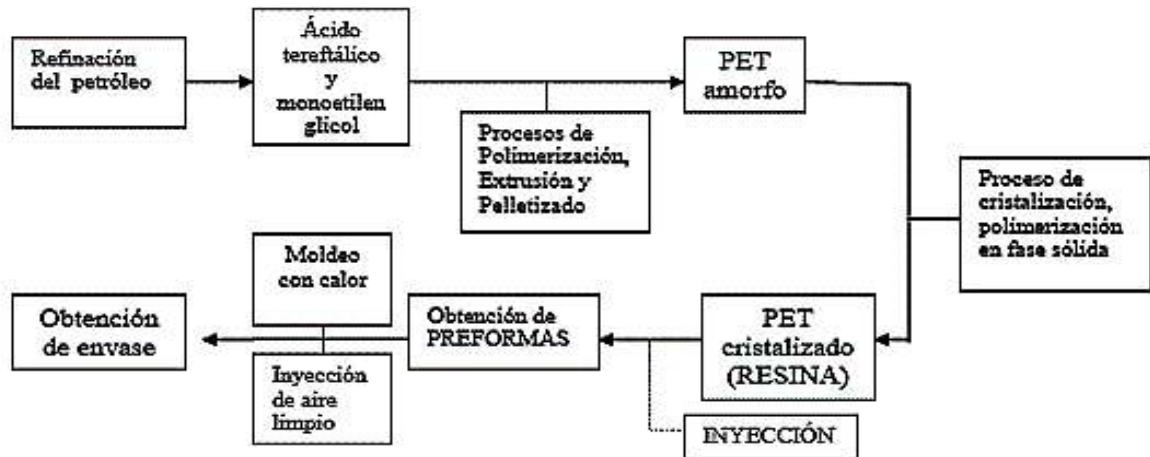
Existen dos rutas por las cuales se puede obtener el PET. Industrialmente se puede partir de dos productos distintos:

1. Ácido tereftálico, TPA
2. Dimetil tereftalato, DMT

Haciendo reaccionar TPA o DMT con glicol etilénico mediante el proceso de esterificación se obtiene un monómero, el cual en una fase sucesiva, por medio de policondensación, se polimeriza en resina PET en estado sólido y amorfo se cristaliza y polimeriza con la finalidad de incrementar el peso molecular y la viscosidad. El resultado es la resina que se utiliza para los envases³⁸.

La siguiente figura muestra el diagrama de producción de la resina PET:

Figura: 2.27 Diagrama de flujo para la producción del PET



Fuente: <http://www.quiminet.com/articulos/proceso-de-produccion-del-pet-2561170.htm>

2.22.1 EXTRUSIÓN Y PELLETIZADO

Una vez que se tiene la masa del polímero, se rompe el vacío introduciendo nitrógeno. La masa fundida por efecto de una suave presión ejercida por el

³⁸ Tesis: Liliانا Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. Pág. 32.



nitrógeno es obligada a pasar a través de una extrusora con un dado de orificios múltiples para obtener hilos en forma de spaghetti que, cayendo en una batea con agua, se enfrían y consolidan. Los hilos son cortados en un pelletizador reduciéndose así a gránulos o pellets blancos, brillante, transparente debido a que es amorfo y tiene baja viscosidad o sea un bajo peso molecular, que se utilizan para fabricar principalmente envases.

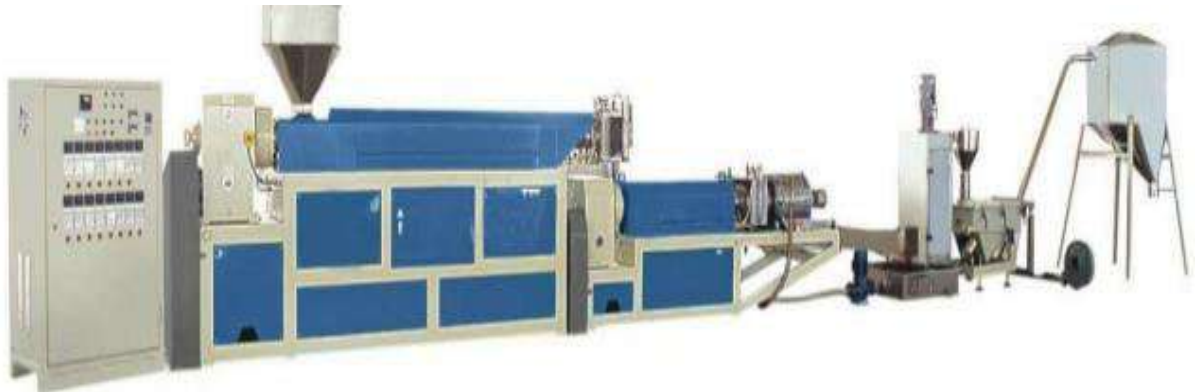
Figura: 2.28 Pellets de PET



Fuente: http://www.cpme-pet.org/sites/default/files/Flake_Pellet_Preform_Bottle.jpg

Para volverlo apto para la producción de botellas son necesarios otros dos pasos: La cristalización y la polimerización en estado sólido.

Figura: 2.29 Peletizadora



Fuente: <http://image.slidesharecdn.com/peletizadodepolmeros-130805185858-phpapp01/95/peletizado-de-polmeros-10-638.jpg?cb=1375729182>

Como todos los termoplásticos puede ser procesado mediante extrusión, inyección, soplado y estirado de preforma y termoconformado.



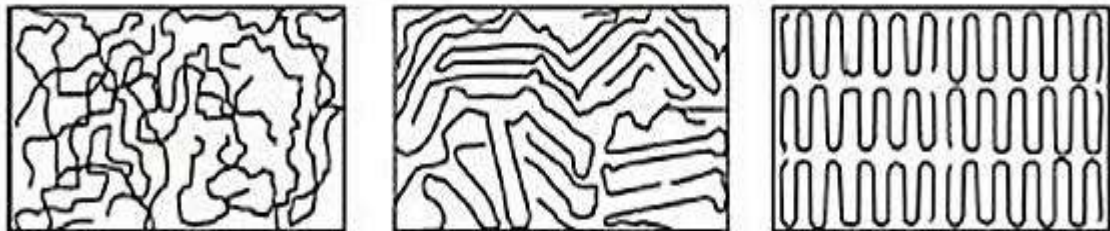
Figura: 2.30 Datos de extrusión de la Cristalización.



Fuente: <http://www.interempresas.net/FotosArtProductos/P78213.jpg>

Los términos cristalino y amorfo se utilizan normalmente para indicar las regiones ordenadas y desordenadas de los polímeros, respectivamente. La siguiente figura muestra un esquema de un sistema amorfo, uno semicristalino y uno cristalino.

Figura 2.31 Sistema amorfo (a), semicristalino (b) y cristalino (c)



(a)

(b)

(c)

Fuente: http://publicaciones.ua.es/filespubli/pdf/63819259788497172325_Fragmento.pdf

Con la cristalización, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm³ en estado amorfo a 1.40 g/cm³ en estado cristalino. Además este proceso permite lograr la resistencia térmica³⁹.

³⁹ Tesis: Lilibiana Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. Pág. 35.



2.22.2 POLIMERIZACIÓN EN ESTADO SÓLIDO O POST POLIMERIZACIÓN

En cuanto al PET grado botella, los pellets solidificados tienen 2 factores y como consecuencia se requiere de un proceso final en la fase de fabricación.

Dichos factores son:

- Posee alto contenido de acetaldehído
- Tiene bajo peso molecular

El proceso final mencionado recibe el nombre de polimerización en estado sólido; consiste en calentar el granulado en una atmósfera inerte con lo que se mejoran simultáneamente las dos propiedades proporcionando mayor facilidad y eficiencia en el proceso de producción y calidad de la botella.

2.22.3 PRODUCCIÓN DE LOS ENVASES

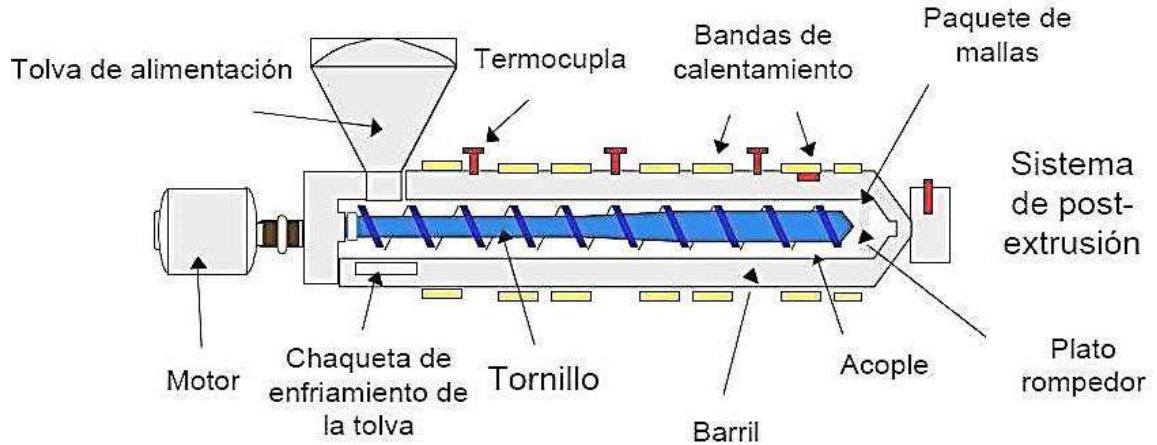
La resina se presenta en forma de pellets, se funden e inyectan a presión en máquinas de las que se producen las preformas que son recipientes aún no inflados y que sólo presentan la corona de la botella en forma final.

Después, para conferirles la orientación biaxial, las preformas son sometidas a un proceso de calentamiento preciso y gradual, posteriormente se colocan dentro de un molde y se les inflan con aire a presión por medio de un pistón hasta alcanzar su forma del molde y se fabrica el envase típico.

Gracias a este proceso, las moléculas se acomodan en forma de red. Esta disposición da al material propiedades de alta resistencia mecánica, química, baja permeabilidad a gases y vapores, larga vida útil, cerrado hermético y ligereza entre otros; material ideal para el envase de productos⁴⁰.

⁴⁰ Tesis: Lilita Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. Pág. 36.

Figura: 2.32 Diagrama de una extrusora



Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.pe/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>

2.22.3.1 PREFORMAS DE PET PROCESO DE EXTRUSIÓN E INYECCIÓN

Los envases de PET empieza con la fabricación de preformas. Éstas se obtienen con la resina de PET se funden a un rango entre 250 y 320 °C y mediante un proceso de extrusionado se inyectan a presión en máquinas inyectoras de cavidades múltiples (16", 32", 64", etc.)⁴¹.

Figura: 2.33 Preforma PET para el diseño de la botella.



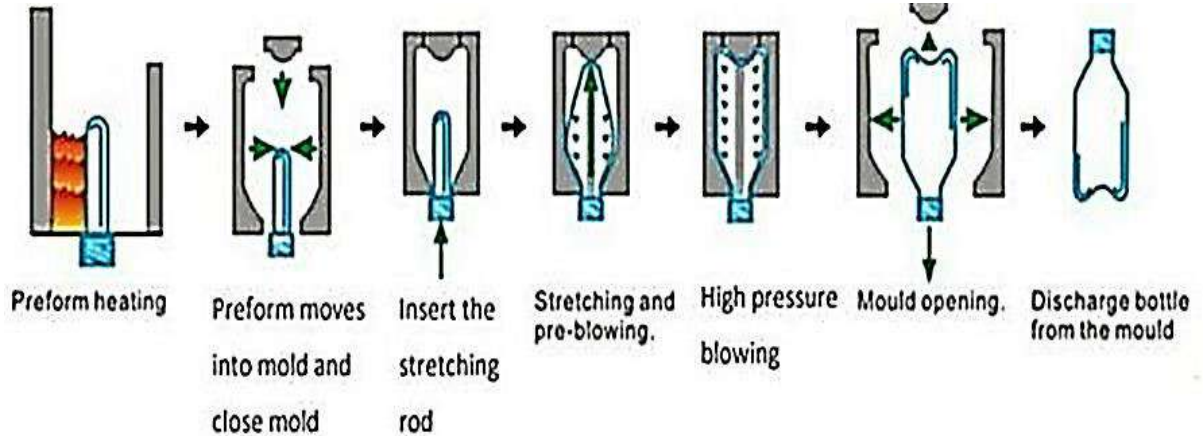
Fuente: <http://www.interempresas.net/Envase/Articulos/54032-EI-diseno-de-envases-PET-reune-forma-y-funcionalidad.html>

⁴¹ Tesis: Liliana Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. Pág. 38.

El proceso para la producción de envases es el siguiente:

- 1) Secado de la resina
- 2) Extrusionado del PET (250 – 320°C)
- 3) Inyección del PET
- 4) Formación de las preformas
- 5) Enfriado de las preformas
- 6) Empaquetado y almacenamiento de las preformas
- 7) Soplado y moldeo de preformas

Figura: 2.34 Proceso de elaboración de los envases de PET



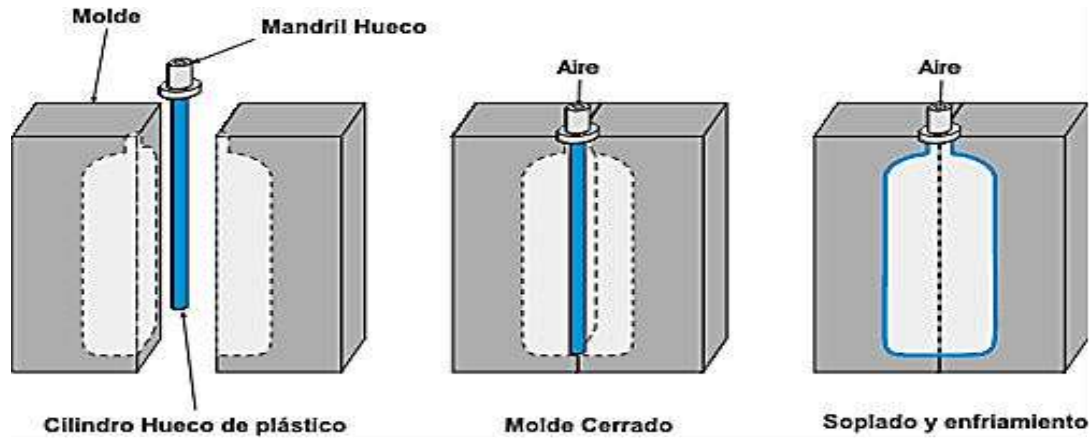
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/buenas-practicas-manufacturas-pet/image005.jpg>

2.22.3.2 MOLDEO POR INYECCIÓN-SOPLADO

El moldeo por inyección-soplado es un proceso usado para hacer botellas, recipientes. Donde la preforma se calienta, se introduce y se inyecta aire a presión en el molde que alberga la geometría deseada. Por último se procede a su extracción⁴².

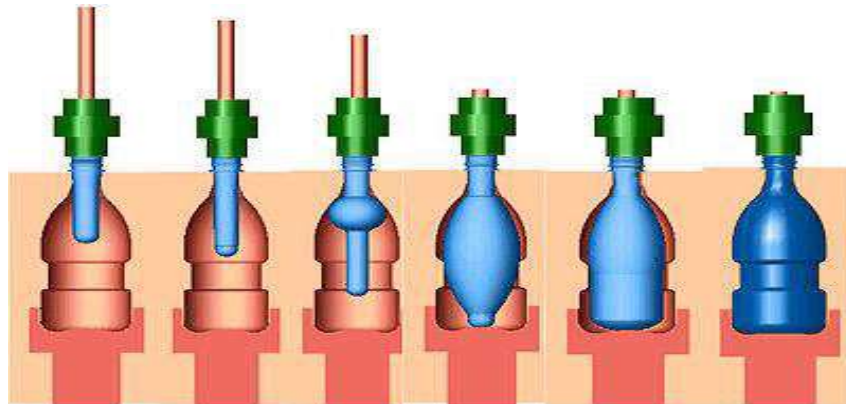
⁴² Tesis: Liliانا Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.

Figura: 2.35 Producción de envase mediante proceso de inyección-soplado



Fuente: Tesis: Liliana Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. Pág. 38.

Figura: 2.36 Producción de envase mediante proceso de inyección soplado biorientado



Fuente: [http://4.bp.blogspot.com/-](http://4.bp.blogspot.com/-WZmvZ4Lg9kg/T3Bm8q_0SNI/AAAAAAAABzE/hOMcSHVyhU4/s1600/estirado+soplado.jpg)

[WZmvZ4Lg9kg/T3Bm8q_0SNI/AAAAAAAABzE/hOMcSHVyhU4/s1600/estirado+soplado.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-WZmvZ4Lg9kg/T3Bm8q_0SNI/AAAAAAAABzE/hOMcSHVyhU4/s1600/estirado+soplado.jpg)

2.23 ESTRUCTURA DEL PET

El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, correspondiendo su fórmula a la de un poliéster aromático.



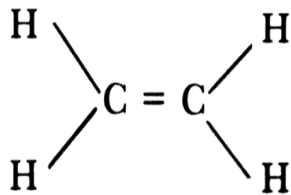
2.23.1 POLIÉSTER (C₁₀H₈O₄)

Los poliésteres son polímeros que contienen eslabones de éster en su estructura molecular; estos pueden ser termoplásticos o termoestables dependiendo de su composición química⁴³.

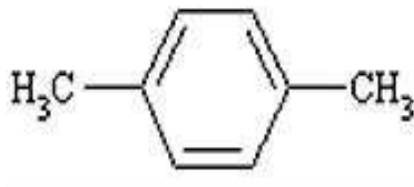
Un termoplástico es un material que a temperatura ambiente es deformable, pero que en presencia de calor se ablanda convirtiéndose en un líquido maleable que se endurece en un estado vítreo cuando se enfría suficiente.

Los plásticos termoestables son materiales que una vez que han sufrido el proceso de calentamiento-fusión y formación-solidificación, se convierten en material muy compacta y de gran rigidez que no vuelven a fundirse. Estos presentan respecto al resto de los plásticos una mayor resistencia térmica por lo que al aportar más calor no logran romperse la estructura de cadenas.

Se fabrica a partir de dos materias primas derivadas del petróleo: el etileno (CH₂ = CH₂) y el paraxileno.



Molécula del etileno



Molécula de paraxileno

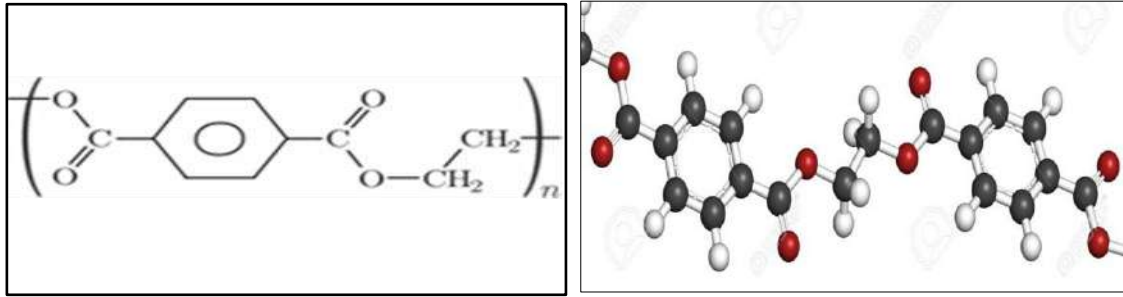
2.23.2 ESTRUCTURA QUÍMICA

La resina PET es un poliéster termoplástico compuesto por cadenas de tereftalato de polietileno. La estructura química del PET es la siguiente:

⁴³ Tesis: Liliana Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.



Figura 2.37 Molécula de PET



Fuente: <http://previews.123rf.com/images/molekuul/molekuul1310/molekuul131000065/23255159-Polyethylene-terephthalate-PET-PETE-polyester-plastic-chemical-structure-linear-fragment-detail-Main-Stock-Photo.jpg>

2.24 CLASIFICACIÓN DEL PET

Este tipo de material se conoce por su grado y aplicación que está en función de la cristalinidad, del peso molecular y en consecuencia de la viscosidad intrínseca. El PET por su baja velocidad de cristalización y en función de las condiciones de operación en la transformación, se puede encontrar en estado amorfo (A-PET) o semicristalino (C-PET) con un 30 a 40% de cristalinidad, lo que quiere decir que el PET es un plástico cristalizable.

Figura 2.38 Grados del PET



Fuente: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/tipos_de_pet.htm

Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y, aquellos de mayor peso molecular, grado ingeniería. El peso molecular del PET grado envase se encuentra intermedio entre el grado película y el grado ingeniería. A mayor peso



molecular, mejores propiedades mecánicas. En cuanto a la cristalinidad, los que la poseen en mayor nivel son para el grado ingeniería; para lámina y botella se utiliza el grado amorfo.

Símbolo del Polietileno de Tereftalato:

Figura 2.39 Símbolo que encontrarás en la base de muchas botellas de agua.



Fuente: http://4.bp.blogspot.com/-9S2ArRmGS_k/T8l0gxVD5PI/AAAAAAAAAAc/zUzVas_xlSM/s1600/PET+1.jpg

2.25 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PET

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material ha alcanzado un desarrollo relevante en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente en la producción de botellas para refresco y agua⁴⁴.

El PET presenta las siguientes propiedades y características (Tecnología de los Plásticos, 2011):

- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes
- Alta resistencia al desgaste y corrosión
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua.
- Buena resistencia a la fluencia

⁴⁴ “Polímeros “ <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>. Consulta 20 agosto 2006.



- Elevada dureza de la superficie
- Ligero
- Buen comportamiento como aislante eléctrico
- Procesable por soplado, inyección y extrusión.
- Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- Transparencia (aunque admite cargas de colorantes) y brillo con efecto lupa.
- En el ranking mundial de plástico se cataloga como N° 1 en reciclado, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.
- Biorientable.
- Cristalizable.
- Esterilizable por rayos gamma y óxido de etileno.
- Buena relación costo / performance.

Alternativas ecológicas

- Retornabilidad.
- Reuso de molienda.
- Fibras.
- Polioles para poliuretanos.
- Poliésteres no saturados.
- Envases no alimenticios.
- Alcohólisis / Metanólisis.
- Incineración.



En la Tabla 2.7 se muestran algunos datos técnicos del PET.

Tabla 2.9 Datos técnicos del PET (Industrias JQ, 2006)

DATOS TÉCNICOS PET				
PROPIEDADES MECÁNICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Peso Específico	gr/cm ³	D-792	5347	1.39
Resistencia a la Tracción (Fluencia/Rotura)	kg/cm ²	D-638	5345	900 / -
Resistencia a la Compresión (1 y 2%)	kg/cm ²	D-695	5345	260 / 480
Resistencia a la Flexión	kg/cm ²	D-790	5345	1450
Resistencia al Choque sin Estallar	kg.cm/cm ²	D-256	5345	>50
Alargamiento a la Rotura	%	D-638	5345	15
Módulo de Elasticidad (Tracción)	kg/cm ²	D-638	5345	37000
Dureza	Shore D	D-2240	5350	85 - 87
Coef. De Roce Estático S/Acero		D-1894		-
Coef. De Roce Dinámico S/Acero		D-1894		0.2
Resistencia al Desgaste Por Roce				Muy Buena
PROPIEDADES TÉRMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Calor Específico	Kcal/Kg.°C	C-351		0.25
Temp. De Flexión B/Carga (18.5Kg/cm ²)	°	D-648	5346	75
Temp. De uso Continuo en Aire	°			- 20 a 110
Temp. De Fusión	°			255
Coef. De Dilatación Lineal de 23 a 100 °C	por °C	D-696	5275	0.00008
Coef. De Conducción Térmica	Kcal/m.h.°C	C-177	5261	0.25

Fuente: <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>

2.25.1 DENSIDAD

La densidad (gr/cm³) de los materiales plásticos, es un factor económico que vuelve favorable la aplicación de un plástico sobre otro. El transformador compra kilogramos de material y vende unidades terminadas⁴⁵.

⁴⁵ Tesis: Liliana Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.



Tabla 2.10 densidad del PET

DENSIDAD		
Amorfo	1.33 / 1.37	g/cm ³
Semicristalino	1.45 / 1.51	g/cm ³
Densidad aparente	0.85	g/cm ³

Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>

2.25.2 ABSORCIÓN DE AGUA

Es la cantidad de absorción de agua en los plásticos, que aumentan su peso, después de estar en contacto continuo con un ambiente húmedo.

Tabla 2.11 Absorción de agua del PET

ABSORCIÓN DE AGUA		
Absorción de agua ASTM	0.16	%
Absorción de agua 24 hr	< 0.7	%
Absorción de agua al equilibrio	0.1	%

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno

2.25.3 PERMEABILIDADES

La permeabilidad en los plásticos es la cantidad de un determinado gas, generalmente oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono o nitrógeno, que traspasa el material por una determinada unidad de superficie, en un determinado tiempo y bajo unas determinadas condiciones. Cuanto menor es la permeabilidad a un gas, mayor es su barrera al mismo. El PET presenta muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad⁴⁶.

⁴⁶ Tesis: Liliana Muñoz Pérez. Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.



La siguiente tabla muestra los valores de permeabilidad del PET.

Tabla 2.12 Permeabilidad del PET

Oxígeno 23°C, 100% RF	2
Nitrógeno 23°C, 100% RF	9
Permeabilidad al vapor de agua	0.9
Dióxido de carbono	5.1

Fuente: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/2893-El-polipropileno-quiere-ser-una-alternativa-al-PET.html>

2.25.4 COMPORTAMIENTO FRENTE A LA TEMPERATURA.

Los poliésteres no mantienen buenas propiedades cuando se les somete a temperaturas superiores a los 70 grados centígrados. Se han logrado mejoras modificando los equipos para permitir llenado en caliente. La temperatura máxima a la que el PET presenta resistencia es de 71 °C. El PET cristalizado (opaco) es una excepción ya que tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230 °C.

La siguiente tabla resume el comportamiento que presenta el PET frente a la temperatura:

Tabla 2.13 Comportamiento de PET frente a la temperatura.

CONCEPTO	VALOR	UNIDAD
Punto de fusión.	250 / 260	°C
Punto de ablandamiento según la prueba Vicat B	170	°C
Calor específico	1.04 / 1.05	kJ/(kg*K)
Coeficiente de expansión lineal	$< 6.10^{-5}$	°C ⁻¹
Temperatura de transición vítrea	8	°C
Expansión térmica	7	E-6/K
Temperatura de servicio	-40 / 100	°C

Fuente: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3235/53324->

[1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)



2.25.5 COMPORTAMIENTO FRENTE A FACTORES ATMOSFÉRICOS

Este polímero no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos por lo que presenta buena estabilidad a la intemperie. Aun así, cuando los envases tienen una exposición prolongada al aire libre pierden su tonicidad, se fragmentan y dispersan. Las botellas enterradas duran más.

La exposición que deben tener los envases en el exterior para presentar fragmentaciones no se conoce con exactitud. Según ensayos realizados en el Centro Experimental de la Vivienda Económica en Argentina, en donde placas y mampuestos fabricados con PET reciclado fueron dispuestos a la intemperie, el PET resultó ser un material con excelente resistencia a los efectos del ambiente.

2.26 PROPIEDADES QUÍMICAS

Debido a sus propiedades químicas el PET representa un material con propiedades de resistencia muy buenas para alcoholes y aceites esenciales, además de una alta resistencia a diversos agentes químicos. Tiene buena resistencia general, en especial a grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes. En contra parte, presenta poca resistencia a solventes halogenados, aromáticos, cetonas de bajo peso molecular y bases.

El PET es resistente a multitud de agentes químicos agresivos los cuales no son soportados por otros materiales. A continuación se muestra su resistencia a diversos químicos.



Tabla 2.14 Resistencia del PET a distintas sustancias químicas

Alcoholes	
Metanol	Muy resistente
Etanol	Muy resistente
Isopropanol	Resistente
Ciclohexanol	Muy resistente
Glicol	Muy resistente
Glicerina	Muy resistente
Alcohol bencílico	Resistente
Aldehídos	
Acetaldehído	Muy resistente
Formaldehído	Muy resistente
Compuestos clorados	
Tetracloruro de carbono	Muy resistente
Cloroformo	Resistente
Difenil clorado	Muy resistente
Tricloro etileno	Muy resistente
Disolventes	
Éter	Muy resistente
Acetona	No resistente
Nitrobenceno	No resistente
Fenol	No resistente
Ácidos	
Acido fórmico	Muy resistente
Ácido acético	Muy resistente
Ácido clorhídrico 10%	Resistente



Ácido clorhídrico 30%	Resistente
Ácido fluorhídrico 10 y 35%	Muy resistente
Ácido nítrico 10%	Muy resistente
Ácido nítrico 65%	No resistente
Ácido fosfórico 30 y 85%	Muy resistente
Ácido sulfúrico 20%	Resistente
Ácido sulfúrico 80%	No resistente
Anhídrido sulfuroso seco	Muy resistente
Álcalis (soluciones acuosas)	
Hidróxido amónico	No resistente
Hidróxido cálcico	Muy resistente
Hidróxido sódico	No resistente
Sales (soluciones)	
Dicromato	Muy resistente
Carbonatos alcalinos	Muy resistente
Cianuros	Muy resistente
Fluoruros	Muy resistente
Sustancia varias	
Cloro	Muy resistente
Agua	Muy resistente
Peróxido de hidrógeno	Muy resistente
Oxígeno	Muy resistente

Fuente: Industria del Plástico, Plástico Industrial.



2.27 PROPIEDADES BIOLÓGICAS

El PET es un material resistente a la degradación por microorganismos (biodegradación) ya que éstos no tienen mecanismos para atacarlo. Debido a esta característica no representa un medio adecuado para la proliferación de hongos, parásitos o bacterias de putrefacción. Es resistente al ataque de polillas, roedores e insectos. Al no ser un elemento biodegradable, mantiene su inalterabilidad en el tiempo, lo que le proporciona una larga vida útil.

Estudios recientes llevados a cabo en diferentes países señalan que, dentro de poco tiempo, será realidad una nueva forma de degradación de los envases de PET por una vía microbiológica. En el Instituto Tecnológico de Kyoto el investigador Kohei Oda consiguió que envases PET fuesen degradados en tan sólo ocho semanas por un consorcio de bacterias y, en la mitad de ese tiempo, por una bacteria específica aislada de ese consorcio. Las bacterias identificadas por él metabolizan poliésteres como el PET (2007).

En México, científicos de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI) del Instituto Politécnico Nacional, liderados por el Dr. Claudio Garibay Orijel, lograron mediante pruebas in vitro que consorcios formados por hongos y bacterias degradaran a uno de los principales compuestos del PET: el ácido teraftálico (2009).



CAPÍTULO III.

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación presente titulada “Estabilización de suelos con fibra de Tereftalato de Polietileno – PET probadas en diferentes suelos del Cusco para conseguir un aumento de la capacidad de carga CBR, en la Subrasante para Carreteras”, es una INVESTIGACIÓN APLICADA, tecnológica; el método es eminentemente experimental e inferencial, porque intenta resolver un problema práctico y además hace uso de conocimiento existente actual para lograr este objetivo.

3.1.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN.

La investigación presente tiene como nivel de investigación el CAUSAL – EXPLICATIVO, porque se busca determinar o establecer el porqué de un fenómeno (mejoramiento de suelos con PET, aumento del CBR) explicando este mediante otro fenómeno (adición de PET en el suelo).

La investigación presente es una investigación CAUSAL – MULTIVARIADO.

3.1.3. METODO.

El método que se usara en la presente investigación es CUANTITATIVO EXPERIMENTAL, porque manipula variable y busca medir el efecto de la variable independiente (PET en 0.25%, 0.5%, 1.0% en peso, ancho de fibras de



0.4, 0.9 y 1.3 mm) sobre la variable dependiente (aumento en la resistencia mecánica o resistencia al CBR de los suelos).

3.2. UNIDAD DE ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN.

La población de la investigación son los suelos arcillosos y arenosos de los suelos cercanos a la ciudad del Cusco.

3.2.1. MUESTRA DE ESTUDIO.

La muestra representativa con la cual se trabajará estará tomada de los suelos de Ocollo Pampa, Huancaro, Pata-pata, San Miguel.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

3.3.1. TÉCNICAS.

El procedimiento que se usará será el de OBSERVACIÓN.

3.3.2. INSTRUMENTOS.

El instrumento que se usara será la **Ficha de Observación**. Los formatos de recolección de datos para cada uno de los ensayos de laboratorio que se usaron son los siguientes:

- Formato de recolección de datos para el ensayo de granulometría.
- Formato de recolección de datos para el ensayo de límites de Attenberg.
- Formato de recolección de datos para el ensayo de Proctor Modificado.
- Formato de recolección de datos para el ensayo de CBR.



CAPÍTULO IV.

DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROYECTO

4.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR CBR EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON PET PARA SUBRASANTES PARA CARRETERAS

Se realizaron los ensayos necesarios en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Gobierno Regional Cusco, como el de caracterización de los suelos, para la clasificación de los suelos, antes de ser estabilizado con PET (mezcla SUELO-PET), los ensayos se realizaron de acuerdo a cada uno de los objetivos propuestos, para la mejora de sus propiedades mecánicas a partir del reforzamientos con fibras de plástico reciclado (PET).

El estudio está basado en los siguientes suelos: Arena limoso pobre en arcilla SC - SM (Huancaro- Santiago - Cusco), limo arcilloso CL- ML (Pata Pata - San Jerónimo - Cusco), arcilla arenosa o arcillas pobres CL (Oscollo Pampa - San Jerónimo - Cusco), arcilla limosa inorgánica de mediana plasticidad CL (San Miguel - San Sebastián - Cusco), que fueron seleccionados por el tipo de suelos que necesitan ser mejorados y por bibliografías que tengan el conocimiento de la zonificación geológica del área de la región Cusco, ver ubicación en Anexos.

Toma de muestra: Se llevó a cabo la excavación para tomar la suficiente cantidad de muestra de los cuatro tipos de suelos seleccionados para moldear 60 probetas y para los ensayos necesarios.

Para la caracterización de los suelos se llevaron a cabo los siguientes ensayos de laboratorio, siguiendo la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) se ejecutaron ensayos de granulometría por tamizado, límites de



Atterberg, Relación humedad - Densidad compactada, a la energía de Proctor Modificado MTC E 115 y pruebas de CBR.

Se realizaron las pruebas de CBR sin las fibras de PET, y con las fibras de PET para los cuatro suelos, para luego ser comparadas.

El objetivo es determinar el porcentaje en peso y el ancho de la fibra de PET, que se debe agregar al suelo para mejorar las propiedades mecánicas del suelo.

El material de PET será agregado de manera aleatoria, la cantidad de las fibras plásticas se ha determinado del 0.25%, 0.5%, 1.0% del peso total de la muestra seca y se establecieron fibras de 0.4, 0.9 y 1.3 mm de ancho y una longitud constante de 5 cm que se explicara más adelante.

4.2 MUESTREO DE SUELOS EN CAMPO

Las muestras representativas con la cual se trabajaron estará fueron tomadas de los lugares de Ocollo Pampa, Huamcaro, Pata-pata, San Miguel.

Figura 4.1. Recolección de la muestra en el suelo de San Miguel.



Fuente: propia



En el perfil, se pudo apreciar a través de los cortes existentes del suelo las características de los estratos. (**Exploración de Suelos** incluirá la ejecución de calicatas a 1.50 metros de profundidad: Para el muestreo de suelos y rocas recomienda la aplicación de la norma T 86-90 que equivale a la ASTM D420-69; se aplicará para todos los efectos el procedimiento establecido en las normas MTC E101, MTC E102, MTC E103 y MTC E104, que recoge los mencionados alcances de AASHTO y ASTM. Que permitirá identificar los cortes naturales y/o artificiales, definir los principales estratos de suelos superficiales, delimitar las zonas de los suelos que presentan características similares, asimismo identificar las zonas de riesgo o poco recomendables para emplazar el trazo de la vía).

Lo primero que se debe realizar es el “Muestreo sistemático de Suelo”, conforme a la norma AASHTO: T 2-91 (2000), por lo cual al realizarlo se tendrá mucho cuidado para obtener las muestras, el cual se extraerá por cada estrato que hubiese en el perfil.

Para los ensayos se procedió a extraer la muestra en una cantidad de 200 kilogramos aproximadamente, todo esto para los diferentes ensayos de laboratorio con sus respectivos rótulos, protegidas dentro de bolsas.

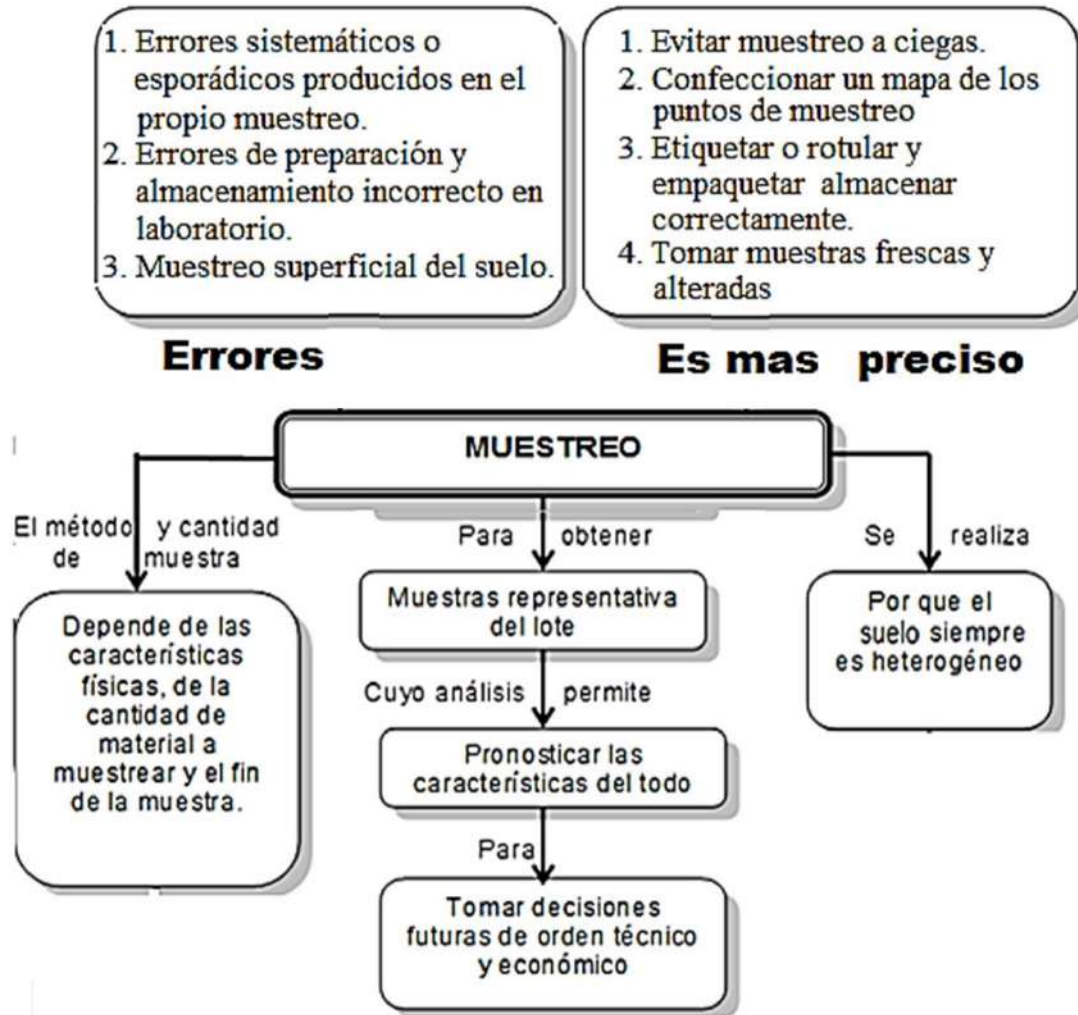
Figura 4.2. Calicata de Pata Pata



Fuente: propia

El objetivo fundamental de la operación del muestreo, es el de obtener una fracción representativa del total de un suelo.

Figura 4.3. Mapa conceptual de un buen muestreo.



Fuente: Elaboración propia

Para el presente trabajo se ha utilizado el método de cono y cuarteo mediante cuarteos sucesivos, para finalmente obtener una cantidad de muestra representativa y suficiente para realizar las pruebas experimentales.

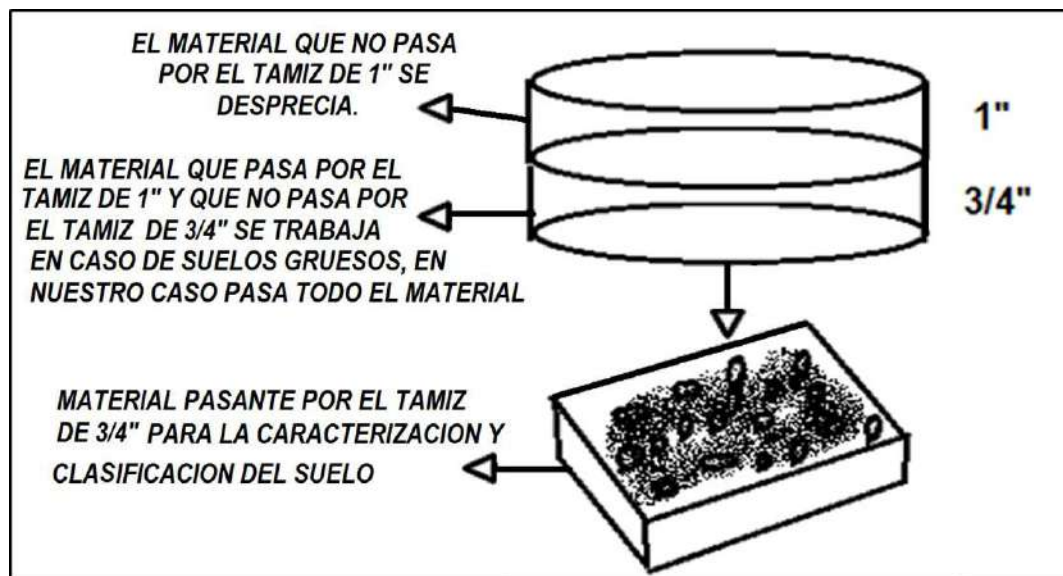
4.3 REDUCCIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS A TAMAÑO DE ENSAYO EN LABORATORIO.

Luego de realizar un adecuado muestreo en campo, lo siguiente es reducir la muestra a tamaño de ensayo en base a norma AASHTO: T 248-02, de tal manera que la selección sea representativa de todo el material.

Para realizar los ensayos se tamizo el material en la malla N° 3/4”.

La operación de tamizado se muestra en la figura 4.4.

Figura 4.4 selección del material para ensayos de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia

SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO: Existen tres métodos para realizar una reducción de muestra: Método A (Cuarteador Mecánico), Método B (Cuarteador Manual) y Método C (Apilamiento Miniatura).

En nuestro caso por ser un suelo en su mayoría de grano fino y por contar con humedad ambiente, la reducción de muestra a tamaño de ensayo se realizó por el Método A (cuarteo mecánico), tal como se describe a



continuación: la muestra entera es secada para lograr la condición seca, usando temperaturas que no excedan las especificaciones para cualquiera de los ensayos contemplados, y entonces se realiza la reducción de la muestra.

Las herramientas consistirán en una regla, un cucharón de fondo plano, pala o cuchara de albañil, una escoba o brocha y una lona de aproximadamente 2x2.5m (6x8 pies) como se muestra en la figura 4.5.

Figura 4.5. Herramientas para el muestreo de suelos.



Fuente: Propia.

La siguiente figura muestra el cuarteador mecánico para el muestreo de suelos.

Figura 4.6. Cuarteador mecánico de rifle para el muestreo de suelos.



Fuente: Propia.



Se colocó la muestra original en una superficie dura, limpia y nivelada donde no se produzcan pérdidas de suelo ni adición accidental de material extraño y luego rosear la muestra de suelo sobre el cuarteador de rifle como se muestra en la figura 4.7.

Figura 4.7. Cuarteo mecánico del suelo.



Fuente: Propia.

Se busca con estos procedimientos reducir la muestra total obtenida en campo a un tamaño de muestra sea representativa conveniente para realizar los ensayos en laboratorio que describan al suelo.

Hay posibilidad de inclusión o exclusión de una sola o dos partículas en la muestra seleccionada para el ensayo y puede influenciar importantemente en la interpretación de las características de la muestra original.

4.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

A continuación se presentan los ensayos de caracterización de los suelos de Ocollo Pampa, Huancaro, Pata-pata y San Miguel. Se realizaron los siguientes ensayos de clasificación física y mecánica respectiva de laboratorio:

- Análisis granulométrico por tamizado MTC E 107.
- Determinación del límite líquido MTC E 110.



- Determinación del límite plástico MTC E 111 y se calcularon su IP.
- Relación humedad-densidad compactada a la energía de Proctor.
Modificado MTC E 115.
- CBR MTCE132.

4.5 LÍMITES DE ATTERBERG

Estos límites de Atterberg que miden la cohesión del suelo son: el límite líquido (LL, según ensayo MTC EM 110), el límite plástico (LP, según ensayo MTC EM 111).

OBJETIVOS:

Determinar el índice plástico, el Límite líquido y el Límite plástico, para clasificar las diferentes muestras de suelo de Cusco.

4.5.1 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO.

El límite líquido determina el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico, en base a la norma AASHTO T 89, valor que servirá para clasificar el suelo.

OBJETIVOS:

Para saber el contenido de humedad expresado en porcentaje, cuando este se allá entre el estado plástico y líquido.

HERRAMIENTAS Y MATERIALES:

- 200 g de muestra de suelo que pasen de la malla N° 40.
- Plato de porcelana, preferentemente sin esmaltar o similar para mezclado, de aproximadamente 115 mm de diámetro.



- Espátula, que tenga una hoja aproximadamente de 75 mm a 100 mm de longitud y 20 mm de ancho, con punta redonda.
- Casa grande. (La copa de Casagrande).
- Capsula para límite plástico y líquido.
- Maso.
- Bandeja.
- Ranurador Curvo y plano.

Figura 4.8 Equipo de Casagrande para límite líquido y superficie de vidrio para ensayo de límite plástico.



Fuente: Propia.

PROCEDIMIENTO:

Se tomó una muestra de 100 g del material que pasa por el tamiz de 0.425mm (N° 40).

Figura 4.9. a) Muestra de suelo, b) Tamiz N° 40



a)

b)

Fuente: Propia.



Se agrega agua y se amasa hasta que la muestra obtenga un brillo parecido al brillo metálico. La proporción de material y agua debe ser de una proporción 100 g de suelo a 20 ml de agua y se deja luego reposando 24 horas.

Para material con arenisca es de 4 a 6 horas y ya comenzado los ensayos, no se debe de aumentar material para saturar lo cual sería incorrecto.

Figura 4.10 Saturación de las muestras con agua de los cuatro suelos por un día, para los ensayos de límites de Atterberg y análisis granulométrico.



Fuente: Propia.

La muestra de suelo se amasa bien en un pocillo, con una espátula. Otras adiciones de agua se harán en incrementos de 1 a 3ml. Cada incremento de agua se mezclará con el material de ensayo.

Figura 4.11 Mezclado del suelo con agua para determinación de límite líquido.



Fuente: Propia



Si demasiada humedad, se ha añadido a la muestra, se descartara la muestra o se removerá nuevamente la mezcla hasta que la evaporación natural disminuya para el punto de cierre en un rango aceptable.

El dispositivo para límite líquido se verifica si está en buen estado de funcionamiento.

Luego se ajustó la altura de caída de la copa, de modo que el punto de la copa que entra en contacto con la base se eleve a una altura de $10.0 \pm 0.2\text{mm}$ (1 cm).

Se tomó una cantidad de ésta mezcla se colocará en la copa hasta un espesor máximo de 10mm. El ranurador curvo se utiliza para material con arenisca y el ranurador plano se utiliza para material arcilloso.

Figura 4.12 Pruebas de Límite Líquido de las muestras de suelo.



Fuente: Propia.

El suelo en la copa deberá ser dividido por el ranurador a lo largo del diámetro de la copa a través de la línea central a modo de formar una ranura limpia con una adecuada dimensión como se muestra en la figura.



Figura 4.13 Ranurado del suelo para el ensayo de límite líquido.



Fuente: Propia.

A continuación se gira la manivela de la copa. Cada giro levantara la copa (1cm) y la dejará caer en caída libre, se cuenta la cantidad de golpes (es de 1 golpe por segundo) hasta conseguir que el espacio originado por el ranurador se cierre una longitud de $\frac{1}{2}$ " y se considerará el límite líquido como aquel contenido de humedad en el que la muestra consigue cerrar $\frac{1}{2}$ " a los 25 golpes.

Figura 4.14. Giro de la manivela para dar los golpes y cerrar la ranura, para determinar el límite líquido.



Fuente: propia.

Para la humedad tome un trozo de suelo de aproximadamente del ancho de la espátula, que se extiende de borde a borde de la mezcla del suelo en ángulo recto a la ranura e incluyendo la parte del cierre de la ranura.



Figura 4.15 Toma de muestra para el cálculo de contenido de humedad del límite líquido.



Fuente: propia.

Se realizaron ensayos para cada tipo de suelo, se repitió variando el número de golpes con agua añadida para poner el suelo en una condición más fluido. El objeto de este procedimiento es obtener muestras con coherencia tal que se haga este dentro de los siguientes rangos de número de golpes para cerrar la ranura: 25-35, 20-30, 15-25, por lo que el rango no debe ser menos de 10 golpes, obteniéndose el siguiente resultado de Límite líquido:

Tabla 4.1 Datos para la obtención del límite líquido sector: San Miguel - San Sebastián – Cusco

Ensayo	1	2	3	4
N° de Golpes	35	29	21	17
Recipiente N°	1	13	16	33
R + Suelo Hum	42.31	46.49	31.81	38.11
R + Suelo Seco	39.09	42.84	29.16	33.89
Peso Recip.	30.02	32.94	22.25	23.45
Peso Agua	3.22	3.65	2.65	4.22
Peso S. Seco	9.07	9.90	6.91	10.44
% de Humedad	35.50	36.87	38.35	40.42

Fuente: propia

Tabla 4.2 Datos para la obtención del límite líquido sector: Pata Pata - San Jerónimo – Cusco.

Ensayo	1	2	3	4
N° de Golpes	32	23	20	17
Recipiente N°	28	10	12	24
R + Suelo Hum	41.63	33.35	30.00	34.05
R + Suelo Seco	39.95	31.37	28.09	32.08
Peso Recip.	31.27	21.76	19.15	23.25
Peso Agua	1.68	1.98	1.91	1.97
Peso S. Seco	8.68	9.61	8.94	8.83
% de Humedad	19.35	20.60	21.36	22.31

Fuente: propia

Tabla 4.3 Datos para la obtención del límite líquido sector Ocollopampa – San Jerónimo – Cusco.

Ensayo	1	2	3	4
Nº de Golpes	34	29	22	19
Recipiente Nº	4	5	22	30
R + Suelo Hum	35.33	41.15	26.64	41.80
R + Suelo Seco	33.25	39.37	24.82	39.93
Peso Recip.	23.46	31.24	16.73	32.16
Peso Agua	2.08	1.78	1.82	1.87
Peso S. Seco	9.79	8.13	8.09	7.77
% de Humedad	21.25	21.89	22.50	24.07

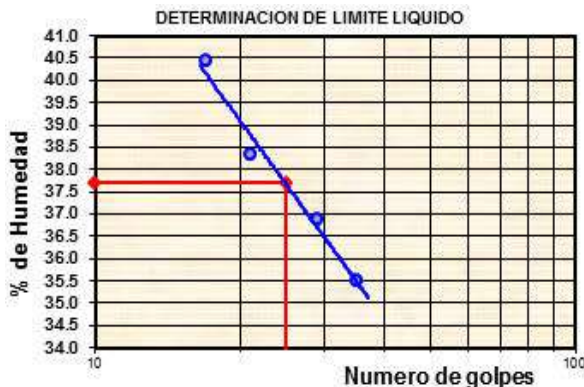
Fuente: Propia.

* Nota: Límite Líquido SECTOR: Huancaro – Santiago – Cusco

NP: No presenta por ser Arena limoso pobre en arcilla.

Se Ploteo la relación entre el contenido de agua (%w) en las ordenadas (Y) y el número de golpes de la copa en las abscisas (X), con los datos de la Tabla 4.1 del sector San Miguel, donde se observa la línea de tendencia de las diferentes humedades con el respectivo número de golpes. Se toma el contenido de agua de la intersección de la línea de las abscisas correspondiente a 25 golpes con la línea que une la dispersión de los valores, que se proyecta hasta cortar con una línea horizontal a las ordenadas, obteniéndose el límite líquido de la Figura 4.16.

Figura 4.16. Diagrama de %humedad versus número de golpes (Gráfico del límite líquido), sector San Miguel.



Fuente: Propia.



Calculo del límite líquido:

El límite líquido puede calcularse a partir de un solo ensayo utilizando la ecuación de Lambe, para no hacer muchos ensayos que puede tomar una gran cantidad de tiempo:

$$LL = W_N * \left[\frac{N^{\circ} \text{ golpes}}{25} \right]^{tan\beta} \quad (4.1)$$

Dónde:

LL = límite líquido, calculado, calculado del suelo.

W_N = Contenido de humedad (%) con respecto al suelo seco, al número de golpes (N° golpes) obtenido en el ensayo.

β = Pendiente de la recta característica en el gráfico semilogarítmico W_N vs. Log N° golpes.

Se encontró que $\tan \beta = 0.121$ no es para todos los suelos sin embargo, se puede generalmente obtener buenos resultados y así permitir calcular el límite líquido de un suelo en base a un solo punto del método mecánico; de donde se puede expresar la anterior ecuación como:

$$LL = W_N * \left[\frac{N^{\circ} \text{ golpes}}{25} \right]^{0.121} \quad (4.2)$$

Tal que se cumpla con la condición, si el contenido de humedad W_N utilizado en la fórmula se determina para un número N° de golpes entre 20 y 30.

La fórmula, se puede simplificar así:

$$LL = W_N * F \quad (4.3)$$

$F = \left[\frac{N^{\circ} \text{ golpes}}{25} \right]^{0.121} = \text{FACTOR DE CORRECCIÓN}$, y que puede obtenerse de la tabla siguiente:



Tabla 4.4 Factor de corrección para cálculo de límite líquido.

N	F
20	0.9734
21	0.9792
22	0.9847
23	0.9900
24	0.9951
25	1
26	1.0048
27	1.0094
28	1.0138
29	1.0182
30	1.0223

Fuente: Carlos Crespo Villalaz, *Mecánica de suelos y cimentaciones 5a ed.*, México. pág. 60

Para el cálculo de LL, se extrae de la muestra una determinada cantidad, se coloca en un recipiente, se pesa, se seca en un horno y se vuelve a pesar una vez seca, el límite líquido se calcula así:

$$LL = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \quad (4.4)$$

En la que:

LL= Límite líquido en %.

P_h= Peso de la muestra húmeda, en gramos.

P_s= Peso de la muestra seca, en gramos.

P_w= Contenido de la muestra, en gramos.

Tabla 4.5: Resumen resultados de límite líquido de los diferentes suelos.

Límite líquido de San Miguel - San Sebastián - Cusco:	37.69 %.
Límite líquido de Pata Pata - San Jerónimo – Cusco:	20.60 %.
Límite líquido de Ocollopampa – San Jerónimo - Cusco:	22.46 %.
Límite líquido de Huancaro – Santiago – Cusco:	NP

Fuente: Propia.



4.5.1.1 ENSAYO DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO CON REFORZAMIENTO DE PET.

Los ensayos se realizaron con fibras de 5 cm de largo, con un ancho de fibras de 0.4 mm y con un porcentaje en peso de 0.5% de fibra de PET.

Figura 4.17. Mezclado del suelo saturado con PET, para el ensayo de límite líquido.



Fuente: propia.

Se tomó una cantidad de ésta mezcla para colocar en la copa hasta un espesor máximo de 10mm. Se encontró la dificultad de hacer la ranura al dividir con el ranurador a lo largo del diámetro de la copa, para tener una ranura limpia con una adecuada dimensión, se utilizó la espátula para corregir las fallas de las fibras de PET para que no afecten el normal desarrollo del ensayo de límite líquido.



Figura 4.18. Aumento de agua en el suelo para el punto de 25 golpes para determinar de límite líquido.



Fuente: propia.

Se cuenta la cantidad de golpes hasta conseguir que el espacio originado por el ranurador se cierre una longitud de $\frac{1}{2}$ ”, también se observó que las fibras de PET no permitieron el cierre de la ranura entonces se aumentó más agua hasta conseguir la humedad óptima de este límite líquido en el que la muestra consigue cerrar $\frac{1}{2}$ ” a los 25 golpes como se muestra en la figura.

Figura 4.19 Pruebas de Límite Líquido de las muestras de suelo.



Fuente: propia.



Figura 4.20 Toma de muestra para el cálculo del contenido de humedad del límite líquido.



Fuente: propia.

El suelo con PET ayuda a la cohesión entre las partículas del suelo, por sus formas aplanadas y pequeños tamaños, la alta relación entre área y volumen de granos, se generan fuerzas interpartículas que los ligan con el PET. Estas fuerzas eléctricas que explican la cohesión son varias: las fuerzas de Van der Waal, sumada a la acción de algunos cationes y a cargas asociadas al efecto borde y cara entre granos y las fibras de PET.

Tabla 4.6 Resultados del Límite Plástico SUELO con PET, sector San Miguel.

Ensayo	1	2	3	4
N° de Golpes	36	29	21	17
Recipiente N°	14	12	8	7
R + Suelo Hum	50.70	46.71	35.26	38.41
R + Suelo Seco	46.67	42.74	30.58	33.89
Peso Recip.	35.90	32.64	19.15	23.45
Peso Agua	4.03	3.97	4.68	4.52
Peso S. Seco	10.77	10.10	11.43	10.44
% de Humedad	37.42	39.31	40.94	43.30

Fuente: Propia.

L.L : 40.17

Tabla 4.7 Resultados del Límite Plástico suelo con PET, sector Pata pata

Ensayo	1	2	3	4
N° de Golpes	35	24	20	18
Recipiente N°	5	2	9	20
R + Suelo Hum	42.57	34.29	30.88	34.98
R + Suelo Seco	40.96	32.38	29.10	33.09
Peso Recip.	33.10	23.76	22.15	25.25
Peso Agua	1.61	1.91	1.78	1.89
Peso S. Seco	7.86	8.62	6.95	7.84
% de Humedad	20.48	22.16	25.61	24.11

Fuente: Propia.

L.L : 22.88

Tabla 4.8 Resultados del Límite Plástico suelo con PET, sector Oscollopampa.

Ensayo	1	2	3	4
N° de Golpes	36	29	21	18
Recipiente N°	29	9	13	40
R + Suelo Hum	38.48	44.30	29.81	43.95
R + Suelo Seco	36.23	42.35	27.80	41.91
Peso Recip.	26.44	34.22	19.71	34.14
Peso Agua	2.25	1.95	2.01	2.04
Peso S. Seco	9.79	8.13	8.09	7.77
% de Humedad	22.98	23.99	24.85	26.25

Fuente: Propia.

L.L : 24.52

Tabla 4.9: Resumen resultados de límite líquido de los diferentes suelos reforzados con fibras de PET.

Límite líquido de San Miguel - San Sebastián - Cusco:	40.17%.
Límite líquido de Pata Pata - San Jerónimo – Cusco:	22.88%.
Límite líquido de Oscollopampa – San Jerónimo - Cusco:	24.52 %.
Límite líquido de Huancaro – Santiago – Cusco:	NP

Fuente: Propia.

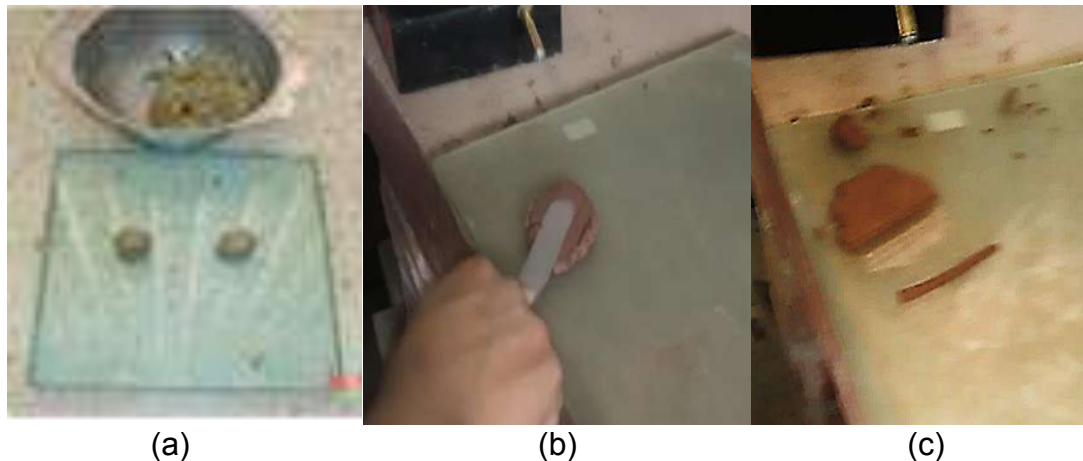


4.5.2 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO

Se realizó con una muestra de suelo de unos 20 g del material que pasa por el tamiz de N° 40, se mezcla el suelo con agua destilada hasta que la masa se convierte en lo suficientemente plástica.

Tome la muestra alrededor de 8 g hasta que esta se convierta lo suficientemente plástico como para hacerla fácilmente en forma de una bola sin que se pegue en los dedos cuando se apreté demasiado.

Figura 4.21. Porción de 8 g de masa de suelo en forma de esfera elipsoidal: a) Masa de suelo en forma de bola, b) Aplanado de la masa de suelo, c) Cortado de la masa de 1.5 a 2.0 g suelo.



Fuente: propia.

Ruede la masa del suelo entre la palma de la mano y sobre la placa de vidrio, hasta obtener un rollito de 3 mm de diámetro, a un ritmo de 8 a 90 rodaduras por minuto, hasta que empiece a presentar grietas en toda su longitud, esto no debe tomar más de 2 minutos.



Figura 4.22 Formado de los rollitos para llegar al diámetro de 3mm hasta presentar las grietas.



Fuente: Propia.

Reunir las partes de la muestra en rollito o que se derrumbó, colocarla en un recipiente y luego pesarla, inmediatamente cubrir el recipiente para no producir pérdida de humedad.

Figura 4.23 Rollito de suelo desmoronado con diámetro de 3 mm aproximadamente con dicho diámetro.



Fuente: propia



Repetir las operaciones descritas anteriormente, hasta obtener una muestra representativa del suelo, para determinar su humedad, el valor promedio de estas humedades se reportara como el límite plástico de conformidad con la norma MTC E108 (ASTM D 2216), y registrar los resultados.

Figura 4.24. Muestras de suelo de los ensayos de límite líquido y límite plástico para el cálculo de humedades.



Fuente: Propia.

El valor de Límite de Plasticidad se reportará al entero más próximo. Se calcula el límite plástico, mediante la siguiente fórmula⁴⁷:

$$LP = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \quad (4.5)$$

En la que:

LP = Humedad correspondiente al límite plástico; en %.

P_h = Peso de los trocitos de filamentos húmedos, en gramos.

P_s = Peso de los trocitos de filamentos secos, en gramos.

P_w = Peso del agua contenida en los filamentos pesados, en gramos.

Para el suelo objeto de estudio se obtuvo el siguiente resultado:

⁴⁷ Fuente: Carlos Crespo Villalaz, Mecánica de suelos y cimentaciones 5a ed., México. pág. 62



Tabla 4.10 Resultados del Límite Plástico NTP 339.128, sector San Miguel.

Ensayo	1	2	3	
Recipiente N°	21	14	7	
R + Suelo Hum	26.81	22.51	25.43	
R + Suelo Seco	26.28	22.02	24.98	
Peso Recip.	22.61	18.81	21.90	
Peso Agua	0.53	0.49	0.45	
Peso S. Seco	3.67	3.21	3.08	
% de Humedad	14.44	15.26	14.61	14.77

Fuente: propia

4.5.3 ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS.

Luego del ensayó de límite líquido, se necesita conocer el límite plástico del suelo y con ello el índice de plasticidad, en base a la norma AASHTO T 90-03.

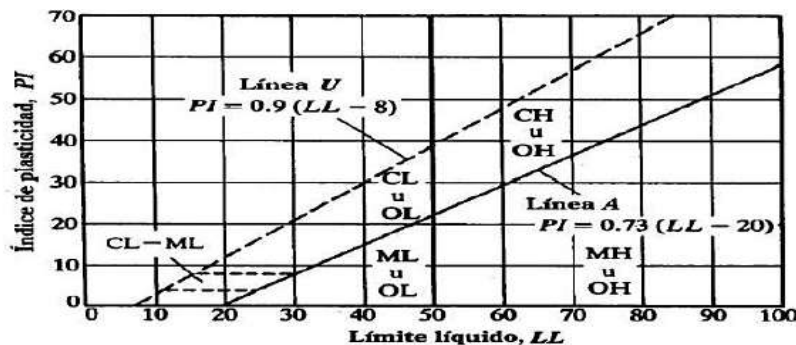
Tabla 4.11 Resumen de resultados de Índice de Plasticidad de los diferentes suelos.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD		
Índice de Plasticidad (IP) = Límite Líquido – Límite Plástico		IP %
San Miguel - San Sebastián - Cusco:	37.69% - 14.77%	22.92
Pata Pata - San Jerónimo – Cusco:	20.60% - 15.02%	5.59
Oscollopampa – San Jerónimo - Cusco:	22.46% - 14.84%	7.62
Huancaro – Santiago – Cusco:	No presenta	NP

Fuente: propia

Observación: No se pudo realizar el ensayó de límite plástico de la muestra de suelo reforzado con fibras de PET, por las características de la prueba y el material de la fibra de PET.

Figura 4.25. Carta de plasticidad



Fuente: Soils and Waves, John Wiley & Son



4.6 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SUELO

OBJETIVOS

- El objetivo principal, es el de poder clasificar el suelo, determinando la distribución de tamaños de las partículas del suelo, que pasan por los distintos tamices.
- Conocer y definir ciertas características importantes del suelo como son: La Permeabilidad, Cohesión, y facilidad de drenaje para saber si pueden ser utilizados para la construcción de proyectos.

MATERIALES Y EQUIPOS

- Tamices de la serie ASTM (3", 2½", 2", 1½", 1", ¾", ½", 3/8", ¼", 4, 10, 40, 100, 200)
- Balanza electrónica. (0.1 gr. de precisión).
- Espátula.
- Recipientes y Bandejas.
- Horno eléctrico (temperatura 105 ± 5)
- brochas de cerda.

Figura 4.26. a) Juego de tamices de la serie ASTM, b) Balanza electrónica.



(a)



(b)

Fuente: Propia.



PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

- Primero se limpian correctamente las mallas a utilizar y la muestra representativa para el análisis granulométrico se obtiene mediante el cuarteo.
- Previamente antes del tamizado, hacemos secar la muestra en el horno durante 24 horas. Luego se pesa el material seco.
- Pero en nuestro caso no existe material grueso es escaso, entonces solo se lava en la malla N° 200 hasta que el agua salga clara.
- Todo el material retenido en el Tamiz N° 200, será arena, ya que los más finos fueron lavados, se coloca el material retenido en un recipiente, limpiar el material adherido del tamiz, haciendo uso del frasco lavador.
- Se descanta el agua y se seca la muestra en el horno a una temperatura de 105 ± 5 C° por 18 horas aproximadamente.
- Luego se deja enfriar y se procede a tamizar por medio de tamices 3”, 2½”, 2”, 1½”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, ¼”, 4, 10, 40, 100, 200. Se pesan las fracciones retenidas en cada uno de tamices, y se anotan en la hoja de registro.
- Posteriormente pesamos los pesos retenidos de la fracción del material en cada tamiz con mucho cuidado y el peso se anota en la hoja de registro, en nuestro caso se pesó el material que fue lavado en el Tamiz No 200.
- Con los datos ya podemos comenzar a realizar los posteriores cálculos.
- Finalmente calculamos los % retenidos y los % pasantes en cada malla.

Figura 4.27. Preparación de muestra de ensayo para el lavado en la malla N° 200



Fuente: Propia.



Lavado del material: Agitar la muestra con suficiente vigor para que haya una separación completa de todas las partículas más finas que el tamiz de 75 μm (N° 200) de las partículas más gruesas, y que el material fino quede en suspensión. Repetir esta operación hasta que el agua de lavado salga clara.

Figura 4.28. Tamizado en húmedo de la muestra de suelo a la malla N° 200



Fuente: Propia.

Regresado de todo el suelo retenido en el tamiz N° 200, limpiando con un chorro de agua la muestra lavada. Secado del suelo lavado a una temperatura de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) y determinar la masa con una precisión del 0.1 por ciento de la masa original de la muestra.

Los resultados obtenidos en la realización de este ensayo a continuación se presentan:

Tabla 4.12 Datos de ensayo del material del suelo de San Miguel - San Sebastián.

Peso total	935.3 g
Peso retenido en malla N° 200 por lavado.	168.7 g
Perdida por lavado	766.6 g

Con esto se procede luego a determinar la granulometría del material retenido en la malla N° 200 (168.7 g), de acuerdo a la norma ASTM C 136, y se realiza para determinar el tamaño de las partículas de la muestra de suelo. En la Tabla 4.13 se muestra los resultados obtenidos en el ensayo.



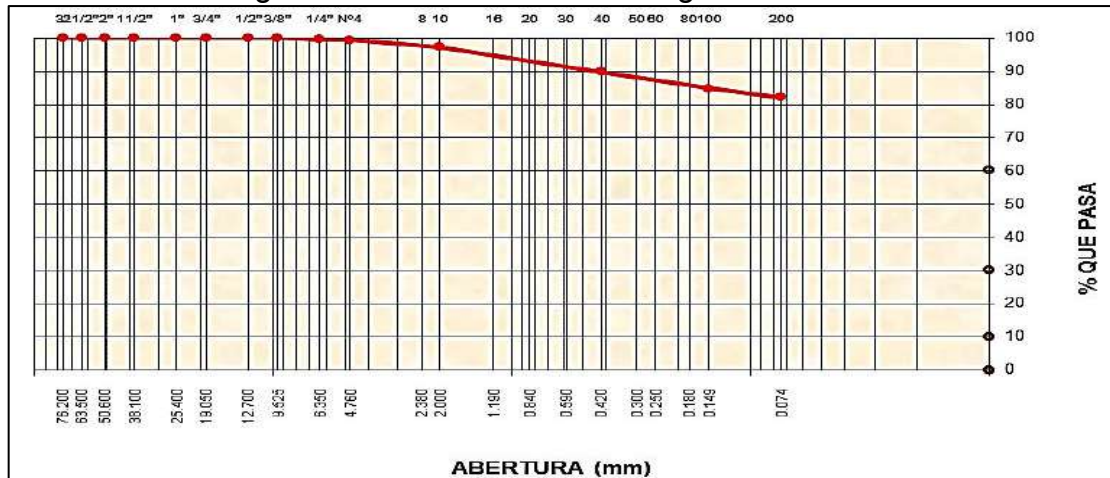
Tabla 4.13 Datos ensayo de granulometría

REALIZADO POR	: Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA				
TESIS	: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON PET PROBADAS EN DIFERENTES SUELOS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, DE SUBRASANTE PARA CARRETERAS				
UBICACIÓN	: Prov. Cusco, Dpto. Cusco				
FECHA	: 25 de marzo 2016				
SECTOR	: San Miguel - San Sebastián - Cusco				
Granulometría (NTP 339,127)					
Malla		Peso	% Ret	% Ret	% que
Tamiz	mm.	(gr)	Parcial	Acum.	Pasa
3"	76.200				100.00
2 1/2"	63.500	0.0	0.00	0.0	100.00
2"	50.600	0.0	0.00	0.0	100.00
1 1/2"	38.100	0.0	0.00	0.0	100.00
1"	25.400	0.0	0.00	0.0	100.00
3/4"	19.050	0.0	0.00	0.0	100.00
1/2"	12.700	0.0	0.00	0.0	100.00
3/8"	9.525	0.0	0.00	0.0	100.00
1/4"	6.350	3.6	0.40	0.4	99.60
No4	4.760	2.1	0.20	0.6	99.40
10	2.000	20.7	2.20	2.8	97.20
40	0.420	69.3	7.40	10.2	89.80
100	0.149	47.1	5.00	15.2	84.80
200	0.074	25.0	2.70	17.9	82.10
< 200		1.0	0.10	18.0	82.00
bandeja x lavado		766.6	82.00	100.0	0.00
Total		935.4	100.00		

Fuente: propia.

Con los datos de la Tabla 4.13 se grafica la curva granulométrica de fracción gruesa mostrada en la Figura 4.29.

Figura 4.29. Curva del análisis granulométrico.



Fuente: propia.



Procedimiento de clasificación:

- a) Analizando el material que pasa el tamiz N° 200 = 82.10% > 35% OK, Suelo de Grano Fino.
- b) Analizar las características de la fracción que pasa el tamiz 0.045mm (N° 40) LL= 37.69% y IP=22.92%
- c) Analizando el límite líquido es menor de 40%, por lo cual se toma la nota de 40 max. Analizando el IP es mayor de 11%, por lo cual se toma la nota de 11min. Clasificación: A-6 (17) Suelo Arcilloso limoso.

Índice de grupo:

El Índice de grupo se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de Grupo} = (F-35) [0.2 + 0.005 (LL - 40)] + 0.01 (F-15) (IP-10).$$

Dónde:

F = porcentaje de material que pasa el tamiz de 0.075mm (No 200), expresado como un número entero.

LL =límite líquido.

IP = índice de plasticidad.

$$\text{Índice de Grupo} = (82.1-35)[0.2 + 0.005 (37.69 - 40)] + 0.01 (82.1-15)(22.92-10)$$

$$\text{Índice de Grupo} = 17.54 \approx 18$$

Cuando se calcule el índice de grupo para suelos A-2-6 y A-2-7 mediante la fórmula, solo se tomara en cuenta el IP. Es decir la formula será:

$$\text{Índice de Grupo} = 0.001(F-15) (PI-10).$$

Clasificación SUCS : **CL** (arcilla limosa inorgánica de mediana plasticidad)

Clasificación AASHTO : **A-6 (18)**



El índice de grupo debe expresarse al número entero más cercano. Bajo condiciones del índice de grupo: esto es, un índice de grupo de 0 indica un buen material de subrasante “muy bueno” y un índice de grupo mayor a 9 es “muy pobre”, entonces un índice de grupo igual a 18, indica un material de subrasante “muy pobre”.

Tabla 4.14 Clasificación de suelos según Índice de Grupo

Índice de Grupo	Suelo de Subrasante
IG > 9	Muy Pobre
IG está entre 4 a 9	Pobre
IG está entre 2 a 4	Regular
IG está entre 1 – 2	Bueno
IG está entre 0 – 1	Muy Bueno

Fuente: Manual de Carreteras: sección Suelos y Pavimentos, MTC, Perú - 2003

4.7 ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

OBJETIVO

- Se determinó la relación entre la humedad la óptima y el peso unitario para la compactación que presenta el suelo, en un molde de un tamaño dado con un martillo de 4.5 kg (10 lb.) que cae desde una altura de 457 mm (18 pulg).

EQUIPO Y HERRAMIENTAS:

- Pisón: Metálico
- Molde de compactación con base y collar



- Extractor de muestras: Que nos permita retirar el suelo compactado dentro del cilindro.
- Balanza
- Horno
- Enrasador o regla metálica para nivelar
- Tamices de 3/4" y N°4
- Mazo
- Cucharón para mezclar
- Probeta graduada
- Recipientes para humedad y horno

PROCEDIMIENTO DE PREPARACION DE MUESTRA

El material se secó al aire o en un horno que mantenga una temperatura que no exceda los 60°C (140°F).

Se procedió como se indica en la norma AASHTO T 99 ó la norma AASHTO T 180 para compactación en un molde de 152.4 mm (6”), Cuando más del 75 % pasa la muestra por el tamiz de 19.0 mm (¾”),

Se tamizo una cantidad adecuada sobre el tamiz de ¾”, se desechó el material grueso, si alguno es retenido en el tamiz. En nuestro caso el material pasa más del 75%.

Para cada muestra del suelo se usó 6 kilos y se dosifico agua para diferentes porcentajes de humedades, se realizó en 4 bandejas Para muestra al 4%, 6%, 8%, 10% con las cantidades de agua siguientes:

- La primera muestra se preparó con 240 cm³ (4%)
- La segunda muestra se preparó con 360 cm³ (6%)



- La tercera muestra se preparó con 480 cm³ (8%)
- La cuarta muestra se preparó con 600 cm³ (10%)

Se mezcló la muestra seleccionada con agua para humedecerla para cada bandeja con su respectiva humedad, este procedimiento se hará de forma homogénea.

Figura 4.30 Mezcla de la muestra en forma homogénea



Fuente: propia

Luego inmediatamente realizar el ensayo de Proctor Modificado, antes que pierda su humedad el suelo.

PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN DEL SUELO

1. Antes de colocar la muestra en el molde, lo dividimos en 5 partes iguales para luego coger las 5 partes para las capas de compactación aproximadamente iguales, en el molde de 152.4mm (6pulg).

Figura 4.31. Compactación del suelo por capas.



Fuente: propia

2. Ahora para el compactado se debe realizar en 5 capas, cada capa será compactada con 56 golpes con el pisón metálico.
3. Este proceso se realizó 4 veces con las respectivas humedades ascendentes, para así obtener el peso promedio y restar con el peso del recipiente y obtener el peso unitario compactado del suelo.
4. Luego de la compactación, se sacó el collar de extensión quitando el material adherido en el collar.
5. Con cuidado recorte el suelo excedente compacto de la parte superior del molde usando el borde recto de la regla, los agujeros producidos en la superficie por la remoción de material grueso deben ser rellenados con material y enrasados con la regla y el mazo.



Figura 4.32. Nivelado del suelo compacto



Fuente: Propia.

6. Saque la muestra compactada del molde y realice un corte vertical por el centro. Tome dos muestras de material de una de las caras cortadas, Pese inmediatamente.

Figura N° 4.33. Desmoldado del suelo compacto.



Fuente: propia

7. Coloque al horno para determinar el contenido de humedad, registre los resultados.

8. Y realizar el mismo procedimiento el ensayo de Proctor Modificado con las otras muestras de las bandejas para cada incremento de agua.

4.7.1 RESULTADO DE PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO DEL SECTOR DE SAN MIGUEL.

Tabla. 4.15 Datos de la muestra para el cálculo de humedad óptima.

UAP		UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA "ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL"							
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS									
PROCTOR MODIFICADO NORMAS TÉCNICAS MCE 115, ASIMDI 1557, AASHTO T 180									
DATOS DE LA MUESTRA									
TESIS: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES SUELOS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR EN LA SUBRASANTE PARA CARRETERAS									
REALIZADOR POR	B: FERDINANCCORIMANYA APAZA								
UBICACIÓN	: San Miguel - San Sebastian - Cusco								
FECHA	: MARZO DEL 2016								
Prueba N°	1	2	3	4					
Número de capas	5	5	5	5					
Número de golpes	56	56	56	56					
Peso suelo + molde (gr.)	763	783	785	798					
Peso molde (gr.)	286	286	286	286					
Peso suelo compactado (gr.)	474	497	499	482					
Volumen del molde (cm ³)	213	213	213	213					
Densidad húmeda (gr/cm ³)	2.223	2.327	2.323	2.259					
Humedad (%)									
Tara N°	1	2	3	4	5	6	7	8	
Peso de tara (gr.)	3780	4063	3983	4129	4051	4132	3542	3472	
Tara + suelo húmedo (gr.)	13433	14135	13165	12148	12434	13621	10093	11622	
Tara + suelo seco (gr.)	12190	12855	11865	11025	11203	12165	9052	10294	
Peso del Suelo Húmedo (gr.)	9653	10072	9182	8019	8383	9489	6551	8150	
Peso del Suelo Seco (gr.)	8410	8792	7882	6896	7152	8033	5510	6822	
Peso de agua (gr.)	1243	1280	1300	1123	1231	1456	1041	1328	
Humedad (%)	14.78	14.56	16.49	16.28	17.21	18.13	18.89	19.47	
Promedio	14.67		16.39		17.67		19.18		
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.938		2.000		1.975		1.896		
Mx Densidad Seca (gr/cm ³)	2.000				Contenido Humedad Óptima (%)		16.4		

Fuente: propia.



CALCULO DE LA HUMEDAD ÓPTIMA

$$\% \text{ humedad} = \frac{(P_s+P_t)-(P_s+S_s)}{P_s+P_t} \times 100 \tag{4.6}$$

Dónde:

P_t = peso de la tara

P_s = peso seco

S_s = Suelo seco

La densidad seca se obtiene a partir de la siguiente expresión:

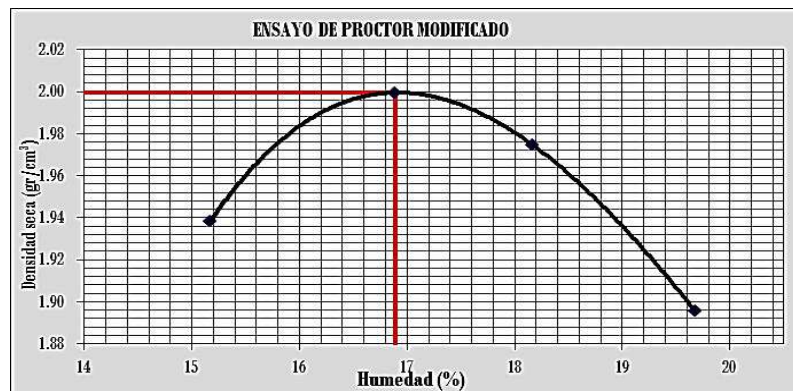
$$\gamma_m = \gamma_d \left(1 + \frac{\%w}{100} \right) \tag{4.7}$$

Donde “ γ_m ” es la Densidad de muestra (densidad húmeda); “ γ_d ” es la densidad seca y “%w” es el porcentaje del contenido de humedad.

Despejando la densidad seca:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{\left(1 + \frac{\%w}{100} \right)} \tag{4.8}$$

Figura 4.34. Grafica de la curva de compactación



Fuente: Propia.

Del grafico se obtuvo la máxima densidad de 2.00 gr/cm³ y el contenido de humedad óptimo de 16.4%; estos resultados concuerdan con los márgenes indicados para arcillas, estos datos servirán para el ensayo de CBR.




Por lo tanto Humedad optima: 16.4%

De 6000 gramos que es el peso de la muestra se multiplica por 16.4 % = 984 mililitros de agua, es la cantidad de agua para usarse en el ensayo de CBR.

4.7.2 RESULTADO DE PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO DEL SECTOR DE HUANCARO.

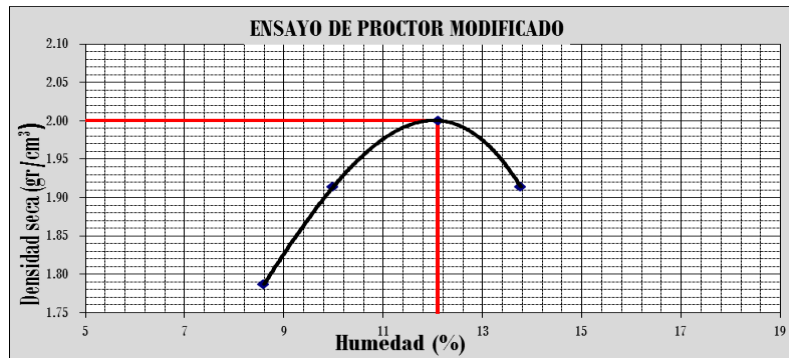
Tabla. 4.16 Datos de la muestra para el cálculo de humedad óptima.

		UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA "ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL"						
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS								
PROCTOR MODIFICADO NORMAS TÉCNICAS MCE 115, ASIMDI 557, AASHOT 180								
DATOS DE LA MUESTRA								
TESIS: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON FIBRA DE TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES SUELOS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR EN LA SUBRASANTE PARA CARRETERAS								
REALIZADO POR	B: FERDINAND CCORIMANYA APAZA							
UBICACIÓN	: Huancaro- Santiago- Cusco							
FECHA	: MARZO DEL 2016							
Prueba N°	1	2	3	4				
Número de capas	5	5	5	5				
Número de golpes	56	56	56	56				
Peso suelo + molde (gr.)	709	730	762	754				
Peso molde (gr.)	286	286	286	286				
Peso suelo compactado (gr.)	413	444	476	468				
Volumen del molde (cm ³)	213	213	213	213				
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.940	2.105	2.242	2.177				
Humedad (%)								
Tara N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de tara (gr.)	4143	4175	4149	4161	4198	4194	4138	4149
Tara + suelo húmedo (gr.)	13016	14336	13554	13749	14262	13969	15022	14871
Tara + suelo seco (gr.)	12310	13519	12672	12888	13199	12881	13723	13556
Peso del Suelo Húmedo (gr.)	8973	10261	9505	9588	10064	9875	10884	10722
Peso del Suelo Seco (gr.)	8267	9444	8623	8827	9001	8787	9585	9407
Peso de agua (gr.)	706	817	882	861	1063	1088	1299	1315
Humedad (%)	8.54	8.65	10.23	9.75	11.81	12.38	13.55	13.98
Promedio	8.60		9.99		12.10		13.77	
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.787		1.914		2.000		1.914	
Máx. Densidad Seca (gr/cm ³)	2.000				Contenido Humedad Óptima (%)		12.1	

Fuente: propia



Figura 4.35. Grafica de la curva de compactación.



Fuente: propia

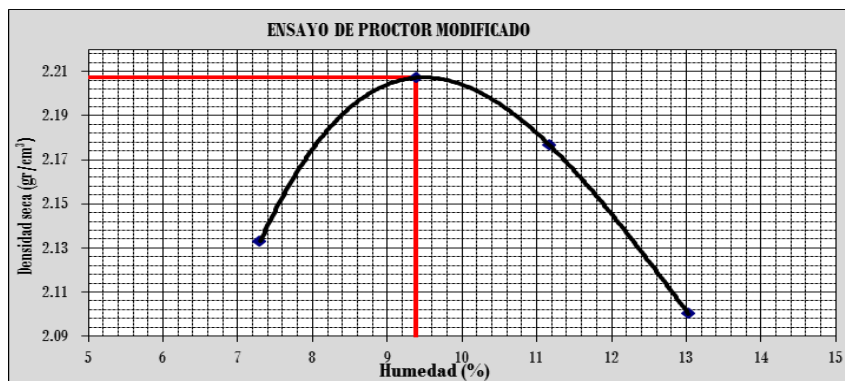
4.7.3 RESULTADO DE PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO DEL SECTOR DE PATA PATA.

Tabla. 4.17 Datos de la muestra para el cálculo de humedad óptima.

		UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL							
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS									
PROCTOR MODIFICADO									
NORMAS TÉCNICAS MCE 115, ASIMDI 557, AASHTO T 180									
DATOS DE LA MUESTRA									
TESIS: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES SUELOS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR EN LA SUBRASANTE PARA CARRETERAS									
REALIZADOR POR	B. FERDINANCCORIMANYA APAZA								
UBICACIÓN	: Pata Pata - Santiago- Cusco								
FECHA	: MARZO DEL 2016								
Prueba N°	1	2	3	4					
Número de capas	5	5	5	5					
Número de golpes	56	56	56	56					
Peso suelo + molde (gr.)	7761	8029	8000	7942					
Peso molde (gr.)	2886	2886	2886	2886					
Peso suelo compactado (gr.)	4875	5143	5154	5056					
Volumen del molde (cm ³)	2130	2130	2130	2130					
Densidad húmeda (gr/cm ³)	2.289	2.415	2.420	2.374					
Humedad (%)									
Tara N°	1	2	3	4	5	6	7	8	
Peso de tara (gr.)	4088	4131	4173	4248	4031	4295	4351	4196	
Tara + suelo húmedo (gr.)	14182	12842	14231	14371	12680	13922	14790	14277	
Tara + suelo seco (gr.)	13460	12280	13385	13484	11811	12954	13570	13131	
Peso del Suelo Húmedo (gr.)	10094	8711	10058	10123	8549	9627	10439	10081	
Peso del Suelo Seco (gr.)	9372	8149	9212	9236	7780	8659	9219	8935	
Peso de agua (gr.)	722	562	846	887	869	968	1220	1146	
Humedad (%)	7.70	6.60	9.18	9.60	11.17	11.18	13.23	12.83	
Promedio	7.30		9.39		11.17		13.03		
Densidad Seca (gr/cm ³)	2.133		2.207		2.177		2.100		
Mx. Densidad Seca (gr/cm ³)	2.207				Contenido Húmedo Óptimo (%)				9.4

Fuente: Propia


Figura 4.36. Grafica de la curva de compactación.



Fuente: Propia

4.7.4 RESULTADO DE PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO DEL SECTOR DE OSCOLLO PAMPA.

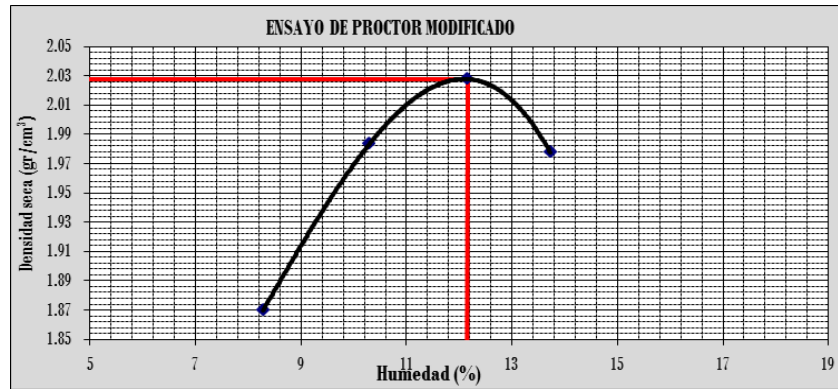
Tabla. 4.18 Datos de la muestra para el cálculo de humedad óptima.

		UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA "ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL"						
		LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS						
		PROCTOR MODIFICADO						
		NORMAS TÉCNICAS MICE 115, ASIMD 1557, ASH101/180						
		DATOS DE LA MUESTRA						
		TESIS: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES SUELOS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, EN LA SUBRASANTE PARA CARRETERAS						
		UNALMENIO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, EN LA SUBRASANTE PARA CARRETERAS						
ELABORADOR	B: FERDINAND CCORIMANYA APAZA							
UBICACIÓN	: Ocollo Pampa- Santiago-Cusco							
RECHA	: MARZO DEL 2016							
Prueba N°	1	2	3	4				
Número de capas	5	5	5	5				
Número de golpes	56	56	56	56				
Peso suelo + molde (gr.)	7198	7546	7730	7677				
Peso molde (gr.)	2886	2886	2886	2886				
Peso suelo compactado (gr.)	4312	4660	4844	4791				
Volumen del molde (cm ³)	2130	2130	2130	2130				
Densidad húmeda (gr/cm ³)	2.024	2.188	2.274	2.249				
Humedad (%)								
Tara N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de tara (gr.)	3997	3808	3964	4068	4140	4127	4012	4106
Tara + suelo húmedo (gr.)	15480	13152	13761	14682	13769	12746	12825	12459
Tara + suelo seco (gr.)	14596	12443	12851	13686	12743	11796	11756	11456
Peso del Suelo Húmedo (gr.)	11483	9344	9797	10614	9629	8619	8813	8353
Peso del Suelo Seco (gr.)	10599	8635	8887	9618	8608	7669	7744	7350
Peso de agua (gr.)	884	709	910	996	1026	950	1069	1003
Humedad (%)	8.34	8.21	10.24	10.36	11.98	12.39	13.80	13.65
Promedio	8.28	10.30	12.16	13.73				
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.870	1.984	2.028	1.978				
Máx. Densidad Seca (gr/cm ³) :	2.028			Contenido Húmedad Óptima (%)		12.0		

Fuente: Propia



Figura 4.37. Grafica de la curva de compactación



Fuente: Propia

4.8 VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR).

El ensayo de CBR con método de compactación ASTM D-1883, MTC E132, en suelo natural sin PET., nos ayuda a determinar materiales para las distintas capas del pavimento para sub-rasantes, sub-bases y bases, a partir de especímenes de laboratorio compactados, El método de ensayo presenta principalmente para la evaluación de la fuerza cohesiva y resistencia al corte de materiales que tengan un tamaño máximo de partículas inferior a 19 mm (3/4 pulg.).

OBJETIVOS

- Determinar un índice CBR, que nos permita expresar las características de resistencia y deformación del material subrasante extraído empleados en el diseño de pavimentos. Dar indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.
- Obtener un resultado lo más correcto posible para realizar correctamente una expresión gráfica Fuerza v/s Penetración del ensayo de la muestra de suelo.
- Determinar los valores de humedad, densidad seca, y CBR para cada punto de las diferentes energías de compactación.
- Dar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.



MATERIALES Y EQUIPO:

<p>Molde: Metálico cilíndrico, diámetro interior 6.0 ± 0.026", altura 7.0 ± 0.018", provistos de un collar de 2" de altura y un plato base perforado.</p>	
<p>Disco espaciador: Circular metálico diámetro $15/16 \pm 1/32$ pulg, y una altura de 2.42 ± 0.01 pulg.</p>	
<p>Pisón Metálico: Cara plana circular de 2" de diámetro, masa de 5.5 ± 0.02 lb y altura de caída libre de 12 a 18".</p>	
<p>Dispositivo para medir la expansión: Placa de metal perforado de 149.2 mm con perforaciones de 1.6mm, provista por un vástago en el centro con un sistema de tornillo que permita regular su altura.</p>	
<p>Pesos de sobrecarga: Peso de metal anular con un agujero en el centro de $2 \pm 1/8$" (54mm) de diámetro y una pesa metálica ranurada, diámetro $5 \frac{7}{8} \pm 1/16$" (149mm), y masa 5 ± 0.10 lb.; (2.3 kg).</p>	



<p>Trípode con deformímetro: Trípode cuyas patas se puedan apoyar en el molde, en el centro un dial (deformímetro), para medir la magnitud del hinchamiento durante la saturación.</p>	
<p>Pistón de penetración: Cilíndrico metálico diámetro 1.954 ± 0.005 pulg; área 3 pulg^2 diámetro y una longitud no inferior a 4 pulg.</p>	
<p>Dispositivo de Carga: Aparato de compresión capaz de aplicar carga creciente uniforme a una razón de 0.05 pulg/min.</p>	
<p>Tanque de remojo: Capaz de mantener el nivel del agua a 25mm (1pulg) sobre la parte superior de los moldes.</p>	



<p>Balanza electrónica: acuerdo los requerimientos de la norma.</p> <p>Fibra de plástico de PET: Tereftalato de polietileno.</p>	
<p>Horno: Termostáticamente controlado capaz de mantener una temperatura de (110)°C ó (230) °F para el secado de las muestras.</p>	
<p>Recipientes para contenido de humedad:</p>	



PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO CBR:

La muestra se compactó de acuerdo con los procedimientos indicados en la AASHTO T 99 o T 180 para la compactación en un molde de 152.4mm (6 pulg.) con excepción de lo siguiente:

Si todo el material pasa a el tamiz de 19.0 mm (3/4pulg.), toda la graduación se utilizará para la preparación de especímenes para la compactación sin modificaciones.

Figura 4.38. Tamizando todo el material de suelo pasa por la malla $\frac{3}{4}$ pulg.



Fuente: Propia

Se hace el mismo procedimiento de Proctor Modificado, de compactación con 56 golpes por las 5 capas. Se utilizó 18 kg de la muestra y le agregamos los 720 mililitros según el resultado que obtuvimos en el Ensayo de Proctor Modificado para obtener el contenido óptimo de humedad de compactación, luego se divide los 18 kg para obtener tres porciones representativas con una masa de aproximadamente 6 kg.



Figura 4.39. Adición de agua para el contenido de humedad óptimo de compactación, según el resultado del Proctor Modificado



Fuente: Propia

Figura 4.40 Mesclado del suelo con el agua (con el contenido óptimo de humedad).



(a) Suelo sin PET.



(b) Suelo con PET.

Fuente: propia.

Normalmente, tres especímenes deben ser compactados (56, 25, y 12 golpes) de manera que se logre una gama de densidades al 95 % (o inferior) y el 100 % de la densidad seca máxima.



Figura 4.41 Mesclado del material con la humedad óptima.



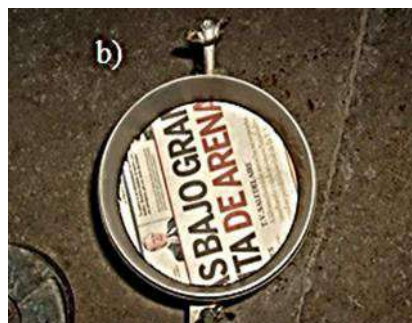
(a) Suelo sin PET.

(b) Suelo con PET.

Fuente: Propia.

Se determinó la masa del molde sin la placa de base y con la precisión más cercana a 5 g (0.01lb) y luego se colocó el disco espaciador más el papel filtro antes de compactar.

Figura 4.42. Colocación del espaciador y papel separador



Fuente: Propia.



Se compacto las porciones de suelo-agua en el molde, utilizando 5 capas iguales.

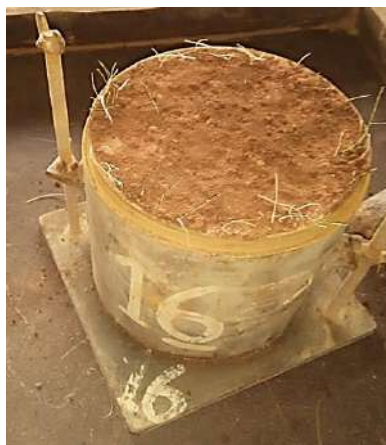
Figura 4.43 Colocado de las capas de suelo con PET para la compactación.



Fuente: Propia.

Una vez terminado las cinco capas se quitara el collarín y utilizando una regla enrrazadora, recortar el suelo compactado hasta nivel superior del molde. Superficies con irregularidades debe ser nivelada con el material compactado del recorte.

Figura 4.44. Compactado del material en el molde.



Fuente: Propia.



Retire el disco espaciador, y pesar el material más el molde, luego coloque un filtro de papel en la placa base perforada, invertir el molde y la tierra compactada y colocar otro papel de filtro para que el suelo compactado esté en contacto con el papel de filtro y adjuntar el collar.

Figura 4.45. Pesado del Molde y Muestra Compacta (en gr.).



Fuente: Propia.

Compactar las otras dos muestras de 6 kg (15lb) para 56, 25 y 12 golpes.

La determinación del contenido de humedad del material compactado es al principio y al final de la compactación. Cada muestra de humedad tendrá una masa de al menos 100g para suelos de grano fino y de 500g para suelos de grano grueso.

Figura 4.46. Toma de muestras para el cálculo de humedades de la compactación.



Fuente: Propia.



Tabla. 4.19 Datos de ensayo de valor de soporte de los suelos (CBR), San Miguel. MTC E 132-2000

REALIZADO POR	Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA						
PROYECTO	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, EN LA SUBRASANTE PARA CARRETERAS						
UBICACIÓN	San Miguel - San Sebastián - Cusco						
DATOS DEL MOLDE (cm.)	MOLDE Nº M	MOLDE Nº 16	MOLDE Nº K	DATOS GENERALES			
	56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES				
Altura	11.70	11.70	11.70	Densidad Seca (Kg/m ³) 2.00			
Diámetro	15.30	15.29	15.29	Humedad Óptima :16.4%			
Volumen	2151.1	2148.3	2148.3				
C DATOS DE COMPACTACION	56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES				
O Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,022	8,924	8,477	Peso del martillo 10 lbs			
M Peso del Molde (gr)	4000	4035	3993	Altura del martillo 18 pulg			
P Peso de la Muestra Compacta (gr)	5,022	4,889	4,484	Número de Capas 5 capas			
A Densidad Humeda (gr/cm ³)	2.33	2.28	2.09	Número de golpes 56 capa			
C Densidad Seca (gr/cm ³)	2.002	1.95	1.78				
H Peso del Tarro (gr)	40.47	39.60	40.86	41.31	39.83	41.05	Clasificación Suelo
U Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)	112.50	121.00	126.20	136.80	124.40	123.54	
M Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)	102.28	109.33	114.35	122.99	112.16	111.58	
E Peso del Agua (gr)	10.22	11.67	11.85	13.81	12.24	11.96	SUCS: OL - CL
D Peso del Suelo Seco (gr)	61.81	69.73	73.49	81.68	72.33	70.53	AASTHO: A-6 (18)
A Contenido de Humedad	16.53%	16.74%	16.12%	16.91%	16.92%	16.96%	
D Contenido de Humedad Promedio	16.64%		16.52%		16.94%		
A Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)	9,060		9,028		8,648		
B Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,022		8,924		8,477		
S Porcentaje de Absorción	0.76%		2.13%		3.81%		

Fuente: Propia.

Saturación de la muestra: Luego se llevara a remojar en el agua por un tiempo de 5 días.

El colocado de los contrapesos en la muestra de suelo con el molde, es para simular una intensidad de carga igual a la masa de la sub-base y base por encima de la superficie y el material ensayado.



Figura 4.47 Colocado de contrapesos y collar de extensión.



Fuente: Propia.

Luego se colocó el trípode con el indicador dial en la parte superior del molde y hacer una primera lectura de marcación. La que debe de marcar en el dial en cero.

Sumergir el molde en agua para permitir el libre acceso de agua a la parte superior e inferior de la muestra y mantener el nivel de agua en el molde aproximadamente 25mm (1pulg.) por encima de la parte superior de la muestra. Remoje la muestra 96 horas (cuatro días).

Figura 4.48. Saturación de las muestras para determinar su valor CBR.



Fuente: Propia.

Al término de los 4 días, hacer una última lectura de marca en el espécimen empapado y calcular el cambio como un porcentaje de la muestra inicial de longitud:



$$\% \text{ de hinchamiento} = \frac{(\text{Cambio de longitud en mm durante el remojo})}{116.43\text{mm o } 127 \text{ mm}} \times 100 \quad (4.9)$$

Tabla. 4.20. Resultados de la expansión del suelo San Miguel.

E	CTE. DIAL EXPANSION 0.001			MOLDENº M			MOLDENº 16			MOLDENº K		
	X	FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.
P	18/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%
A	19/03/2016	10.00	24 horas	8	0.008	0.17%	33	0.033	0.72%	48	0.048	1.04%
N	20/03/2016	10.00	48 horas	8	0.008	0.17%	33	0.033	0.72%	48	0.048	1.04%
S	21/03/2016	10.00	72 horas	8	0.008	0.17%	33	0.033	0.72%	48	0.048	1.04%
I	22/03/2016	10.00	96 horas	8	0.008	0.17%	33	0.033	0.72%	48	0.048	1.04%

Fuente: Propia

Se sacó las muestras del lugar de saturación, elimine el agua de la parte superior y permitir un escurrimiento de los especímenes durante 15 minutos. Se tendrá cuidado de no perturbar la superficie de los especímenes durante eliminación del agua. Después de retirar los sobrepesos y placas perforadas se realizara la prueba de penetración.

Prueba de penetración.

Se colocó sobrepesos de ranuras anulares y pesos en los especímenes igual a la utilizada durante la saturación, para prevenir el desplazamiento de materiales blandos en el agujero. El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una tasa de deformación unitaria de 1.27 mm/min.

Asiento del pistón: Después de asentar el pistón de penetración de 44N (10lb), estableciendo el indicador de penetración de marcación y el indicador de carga a cero. (Se asienta el pistón de penetración con la carga mínima posible y que no sea superior de 4,54 Kg.).



Figura 4.49. Aplicación de carga a las muestras para determinar su valor CBR.



Fuente. Propia.

Luego aplicar las cargas de penetración del pistón a una tasa de penetración uniforme de 1.3mm (0.05pulg.)/min. Registre la carga cuando la penetración sea de 0.64, 1.27, 1.91, 2.54, 5.08, 7.62, 10.16 y 12.7mm (0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.200, 0.300, 0.400 y 0.500 pulg.). Lecturas de carga a penetraciones de 10.16 y 12.70mm (0.400 y 0.500pulg.) se puede obtener, si lo desea ó usar otro rango de lecturas apropiado.

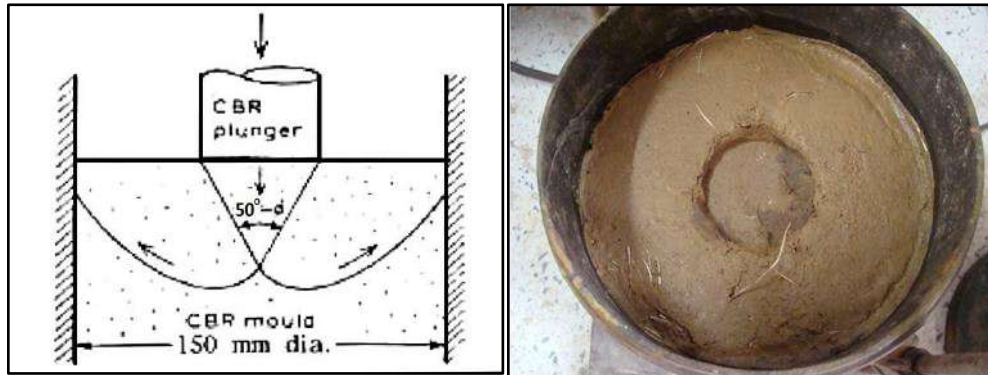
Figura 4.50. Prueba de penetración del pistón



Fuente. Propia.



Figura 4.51 Mecanismo asumido de falla del suelo generado por el pistón de 19.4 cm² en el Ensayo C.B.R. La condición de frontera es un problema.



(a) Mecanismo de falla por el esfuerzo. (b) Suelo después del ensayo.

Fuente: Ing. Luis Chang Chang, Laboratorio Geotécnico Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID).

Figura 4.52. Cantidad moldes después de la Aplicar las cargas de penetración del pistón.



Fuente: Propia.

Figura 4.53. Extracción y pesado del material



Fuente: Propia.

Cálculos: Registrar los valores obtenidos en la penetración, en unidades de PSI, y tabularlos a fin de generar la Curva Tensión-Deformación.

Tabla. 4.21 Datos del ensayo de penetración para la determinación del CBR San Miguel.

AREA PISTON	3.0 Pulg. Cuadr.		MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K		
	TIEMPO	PENETRACION	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.
	(mm)	(pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI
0.5 min	0.64	0.025	11	104	35	9	85	28	3	28	9
1.0 min	1.27	0.050	16	152	51	14	133	44	6	57	19
1.5 min	1.91	0.075	18	171	57	17	161	54	7	66	22
2.0 min	2.54	0.100	21	199	66	19	180	60	8	76	25
4.0 min	5.08	0.200	42	399	133	38	361	120	16	152	51
6.0 min	7.62	0.300	63	599	200	57	542	181	24	228	76
8.0 min	10.16	0.400	84	798	266	76	722	241	32	304	101
10.0 min	12.70	0.500	105	998	333	95	903	301	40	380	127

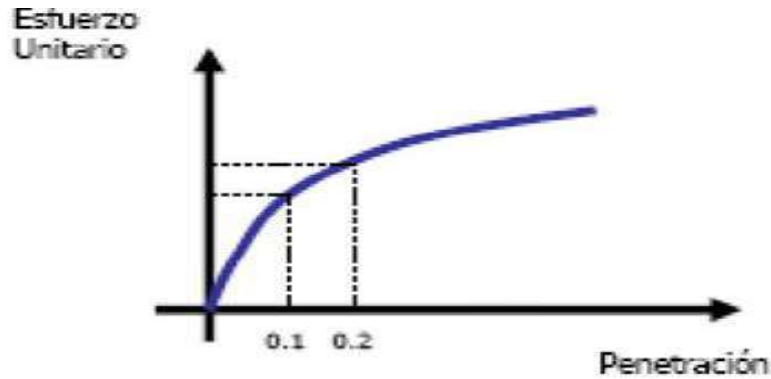
Fuente: Propia.

Los valores de carga corregidos se determina para cada espécimen a 0.10 Pulg. y 0.20 Pulg. de penetración. Si la relación a 0.20 Pulg. de penetración es mayor a la penetración de 0.1pulg la prueba será realizada otra vez. Si la prueba de chequeo da un resultado similar a la relación 0.20 Pulg. de penetración se usará esta.



Luego se leen los valores de carga corregidos para 0.1 pulgadas de penetración y 0.2 pulgadas de penetración.

Figura 4.54. Grafica proyección de carga corregidos para 0.10 pulg y 0.20 Pulg. de penetración.



Fuente: Propia.

El CBR es obtenido en porcentaje, dividiendo los valores de carga corregidos a 0.10 pulg y 0.20 pulg para las cargas unitarias normales de (1000psi y 1500psi) respectivamente y multiplicando estas por 100, para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (con un área de 19.3548 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas. En forma de ecuación, esto es:

Para 0.1 pulg:

$$CBR_{0.1"} = \frac{\text{Presión de penetración para 0.1"}}{\text{Carga unitaria patrón para 0.1"} de penetración} \times 100 \tag{4.10}$$

$$CBR_{0.1} = \frac{66}{1000} \times 100 = 6.6\%$$

$$CBR_{0.1} = \frac{60}{1000} \times 100 = 6\%$$

$$CBR_{0.1} = \frac{25}{1000} \times 100 = 2.5\%$$

CBR AL 95% MDS

$$CBR_{0.1} = \frac{66}{1000} \times 95 = 6.27\%$$

$$CBR_{0.1} = \frac{60}{1000} \times 95 = 5.7\%$$

$$CBR_{0.1} = \frac{25}{1000} \times 95 = 2.38\%$$

$$Promedio = \frac{6.27\% + 5.7\% + 2.38}{3} = 4.8\%$$

Para 0.2 pulg.:

$$CBR_{0.2"} = \frac{\text{Presión de penetración para 0.2"}}{\text{Carga unitaria patrón para 0.2" de penetración}} \times 100 \quad (4.11)$$

$$CBR_{0.1} = \frac{133}{1500} \times 100 = 8.9\%$$

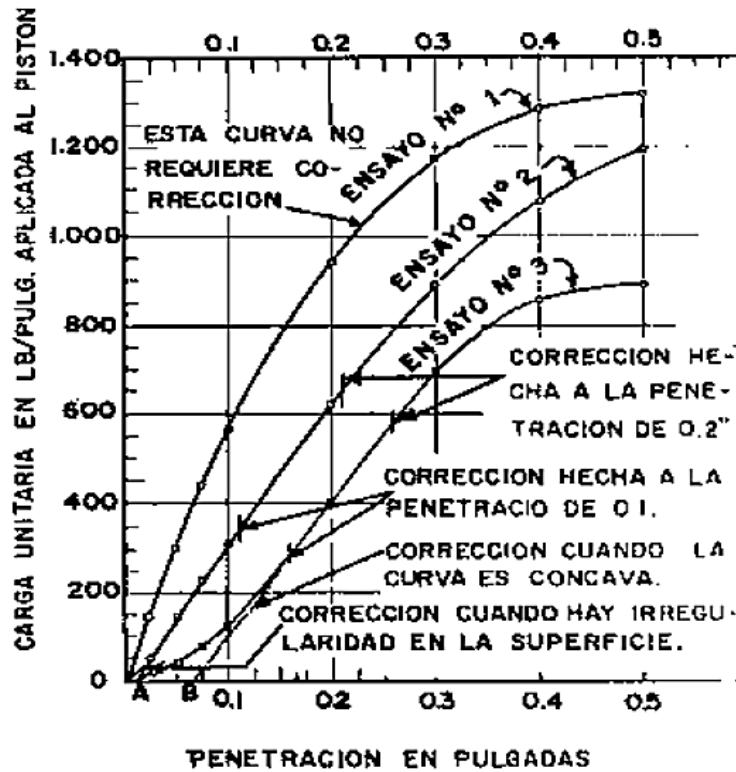
$$CBR_{0.1} = \frac{120}{1500} \times 100 = 8\%$$

$$CBR_{0.1} = \frac{51}{1500} \times 100 = 3.4\%$$

Ya obtenidos los datos necesarios procedemos a realizar la curva esfuerzo versus deformación para 56 golpes, 25 golpes, y 10 golpes, y la curva %C.B.R versus Densidad, para una penetración de 0,1” y 0,2”, de esta curva se obtiene el valor de C.B.R al 95% para una penetración de 0,1”, que es el valor con el cual vamos a trabajar, Ver Fig. 4.49

Si la curva tiene la curvatura con más de dos puntos de inflexión, se debe efectuar la corrección trazando una tangente en el punto de mayor pendiente y se prolonga hasta la base para obtener un cero corregido.

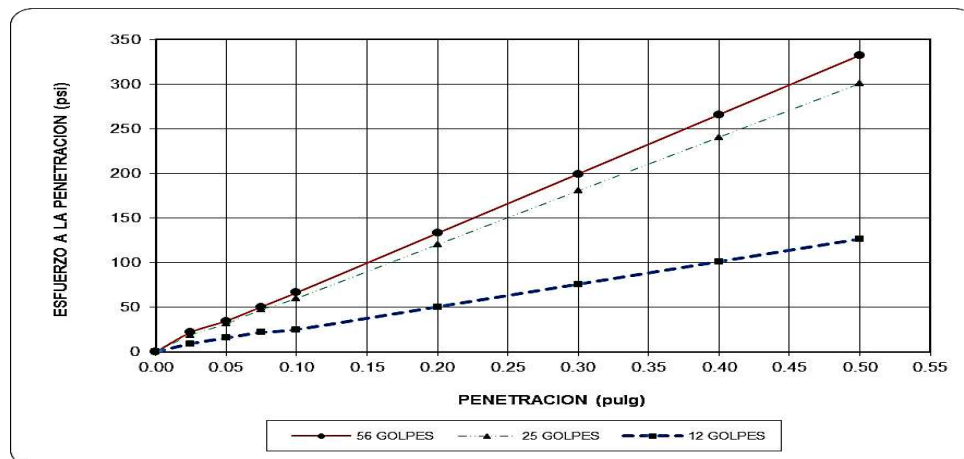
Figura. 4.49 Curvas que relacionan la hinca del pistón con las presiones aplicadas.



Fuente: <http://www.slideshare.net/UCGcertificacionvial/cbr-aashto-t193-cbr-02-490272#btnNext>

Se plotó la curva esfuerzo - deformación para cada espécimen, como a continuación se muestra:

Figura 4.50 Gráfico curva esfuerzo versus deformación.

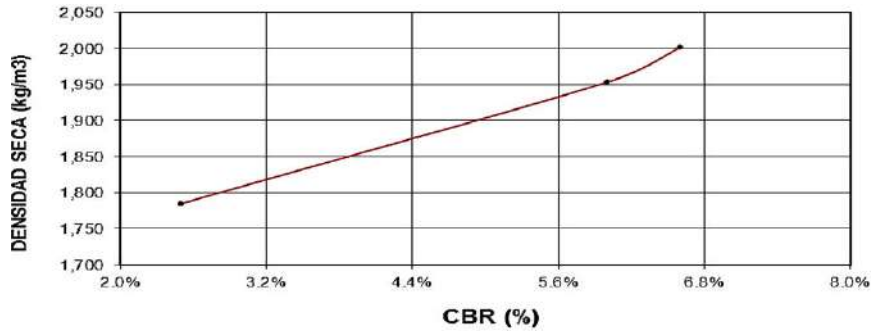


Fuente: propia



De la tabla 4.21 se gráfica la figura 4.56, la cual muestra la relación entre el CBR y la densidad seca, como se puede apreciar estas dos variables tienen una relación directamente proporcional.

Figura 4.56 Gráfica relación entre el CBR y la densidad seca.



Fuente: Propia.

El valor de CBR también clasifica con la siguiente tabla de calificaciones típica.

Tabla. 4.22 El CBR da calificaciones típicas para la clasificación.

No. CBR	Clasificación General	Usos	SISTEMA DE CLASIFICACION	
			Unificado	AASHTO
0-3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Regular	Sub-base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Bueno	Base, sub-base	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Fuente: Joseph E. Bowles, Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil, 1981, McGRAW-HILL de México Pag. 191.

De la anterior ecuación se puede despejar el Valor de carga con los datos siguientes: CBR al 100% = 6.6% y CBR al 95% = 4.8%.

Para Carga Estándar = 1000 psi.

Valor de carga = (CBR/100) x Carga Estándar.



Valor de carga= $(6.6/100) \times 1000 = 66 \text{ psi} = 198 \text{ lb}$.

NOTA: Para convertir un valor de PSI a lb, deberá de multiplicarse este por un factor de 3.

Valor de carga = $(\text{CBR}/100) \times \text{Carga Estándar}$.

Valor de carga = $(4.8/100) \times 1000 = 48 \text{ psi} = 144\text{lb}$.

De acuerdo a la intensidad vehicular sobre la carretera de diseño pueden obtenerse los valores de carga a los cuales es sometida la estructura del pavimento con los cuales pueden compararse ambos CBR y ver cual satisface la demanda de carga; por otro lado esta investigación pretende mejorar esa capacidad de carga al adicionar fibras de PET y comprobar de esa manera las mejoras en estas propiedades del suelo al utilizar ese agente estabilizante.

En cuanto a la longitud óptima de fibra de 5 cm, en cuanto a varias experiencias como la longitud recomendada por la empresa que suministra la fibra TOXEMENT empleada para reforzamiento de suelos limos arcillas y arenosos y para reforzamiento de concretos y morteros.

Tabla. 4.23 Longitud óptima de fibra de 5 cm, recomendada por la empresa TOXEMENT⁴⁸

SUELO	CON FIBRA	L= 5cm , 0.25%	L= 5cm , 0.5%	L= 5cm , 0.75%	L= 5cm , 1%
-------	-----------	----------------	---------------	----------------	-------------

Fuente: TESIS; Análisis del Comportamiento de Suelos Reforzados con Fibra Sintética TOXEMENT, GIOVANNY A. REY NARIÑO; UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Finalmente se dan los resultados de CBR de los diferentes suelos ensayados sin PET, que podemos apreciar en los siguientes cuadros:

⁴⁸ TESIS: Análisis del Comportamiento de Suelos Reforzados con Fibra Sintética TOXEMENT; UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER; Colombia, 2009. En la actualidad es empleada en suelos, concretos y morteros en losas para uso industrial provocándole una aparición más tardía de grietas y una vida útil más larga.



4.9 RESULTADO DE CBR DE LOS SUELOS NATURALES (0% DE FIBRAS DE PET)

Tabla 4.24 Resultados del ensayo CBR de suelos natural San Miguel.

RESULTADOS			
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.002		CBR AL 95% DE MDS = 4.8%
HUMEDAD OPTIMA (%)	:16.4%		CBR AL 100% DE MDS = 6.6%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION:
56 GOLPES	0.17%	0.76%	CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.74
25 GOLPES	0.72%	2.13%	
12 GOLPES	1.04%	3.81%	

Fuente: Propia.

Tabla. 4.25. Resultados del ensayo CBR de suelo natural Huancaro.

RESULTADOS			
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.00		CBR AL 95% DE MDS = 18.1%
HUMEDAD OPTIMA (%)	12.10%		CBR AL 100% DE MDS = 22.2%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION:
56 GOLPES	0.04%	1.67%	CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.75
25 GOLPES	0.07%	2.61%	
12 GOLPES	0.35%	3.08%	

Fuente: Propia.

Tabla 4.26. Resultados del ensayo CBR de suelo natural Oscollo Pampa.

RESULTADOS			
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.109		CBR AL 95% DE MDS = 7.9%
HUMEDAD OPTIMA (%)	12.16%		CBR AL 100% DE MDS = 12.7%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION:
56 GOLPES	0.52%	1.51%	CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.75
25 GOLPES	1.04%	2.21%	
12 GOLPES	1.26%	4.13%	

Fuente: Propia.



Tabla 4.27. Resultados del ensayo CBR de suelo natural Pata Pata.

RESULTADOS			
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.264		CBR AL 95% DE MDS = 17.6%
HUMEDAD OPTIMA (%)	9.40%		CBR AL 100% DE MDS = 23.8%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.75
56 GOLPES	0.05%	1.05%	
25 GOLPES	0.07%	1.76%	
12 GOLPES	0.09%	3.28%	

Fuente: Propia.

En los cuadros anteriores tenemos los resultados de los ensayos de CBR cuyo resumen de resultados es el siguiente:

Tabla 4.28. Resumen de ensayos CBR para para los diferentes materiales.

MATERIAL NATURAL		
CBR (%) para 56 GOLPES		
	CBR al 100%de MDS	CBR al 95 %de MDS
SAN MIGUEL	6.6 %	4.8 %
HUANCARO	22.2 %	18.1 %
PATA PATA	23.8 %	17.6 %
OSCOLLO PAMPA	12.7 %	7.9 %

Fuente: Propia.

Tabla 4.29. Densidad seca para los diferentes materiales.

MATERIAL NATURAL	
Densidad seca (g/cm ³) 56 golpes	
SAN MIGUEL	2.002
HUANCARO	2.00
PATA PATA	2.264
OSCOLLO PAMPA	2.109

Fuente: propia

4.10 ENSAYOS CBR DE SUELO DE SAN MIGUEL REFORZADA CON ADICIÓN DE LA FIBRA DE PET

Los resultados obtenidos del ensayo de CBR del suelo con adición de fibra de PET son los siguientes:



4.10.1 ENSAYO DE CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 0.25% CON UN ANCHO DE 0.4 mm Y DE LONGITUD DE 5 cm

Tabla 4.30. Resultados del ensayo de CBR para subrasante adicionada con 0.25% de fibra de PET.

RESULTADOS			
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m ³)	2.00		CBR AL 95% DE MDS = 6.2%
HUMEDAD OPTIMA (%)	16.72%		CBR AL 100% DE MDS = 10.8%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.81
56 GOLPES	0.02%	0.30%	
25 GOLPES	0.33%	1.91%	
12 GOLPES	0.43%	3.83%	

Fuente: Propia.

4.10.2 ENSAYO CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 0.5% CON UN ANCHO DE 0.4 mm Y DE LONGITUD DE 5 cm.

Tabla 4.31. Resultados del ensayo de CBR para subrasante adicionada con 0.5% de fibra de PET.

RESULTADOS			
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m ³)	2.00		CBR AL 95% DE MDS = 10.3%
HUMEDAD OPTIMA (%)	6.44%		CBR AL 100% DE MDS = 17.7%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.72
56 GOLPES	0.05%	0.79%	
25 GOLPES	0.22%	1.61%	
12 GOLPES	0.30%	6.62%	

Fuente: propia

4.10.3 ENSAYO CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 1% CON UN ANCHO DE 0.4 mm Y DE LONGITUD DE 5 cm.

Tabla 4.32. Resultados del ensayo de CBR para subrasante adicionada con 1% de fibra de PET

RESULTADOS			
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m ³)	1.905		CBR AL 95% DE MDS = 9.0%
HUMEDAD OPTIMA (%)	6.44%		CBR AL 100% DE MDS = 16.2%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.73
56 GOLPES	0.02%	5.77%	
25 GOLPES	0.22%	8.64%	
12 GOLPES	0.50%	11.33%	

Fuente: Propia



4.10.4 ENSAYO CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 1.4 % CON UN ANCHO DE 0.4 mm Y DE LONGITUD DE 5 cm

Tabla 4.33. Resultados del ensayo de CBR para subrasante adicionada con 1.4% de fibra de PET

RESULTADOS			
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	1.708		CBR AL 95% DE MDS = 6.0%
HUMEDAD OPTIMA (%)	6.44%		CBR AL 100% DE MDS = 9.5%

Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION:
56 GOLPES	0.04%	18.04%	CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.66
25 GOLPES	0.24%	21.00%	
12 GOLPES	0.52%	22.18%	

Fuente: propia

4.10.5 RESUMEN DE ENSAYOS DE CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 0.25%, 0.5%, 1%, 1.4% CON UN ANCHO DE 0.4 mm Y DE LONGITUD DE 5 cm

Tabla 4.34. Resumen de CBR para el material con PET

MATERIAL CON PET		
CBR (%) 56 GOLPES		
	CBR al 100%de MDS	CBR al 95 %de MDS
0.25 % de PET	10.8 %	6.2 %
0.5 % de PET	17.7 %	10.3 %
1 % de PET	16.2 %	9 %
1.4 % de PET	9.5 %	6. %

Fuente: Propia.



Figura 4.57 Grafica de CBR versus cantidad de la fibras del PET.



Fuente: propia

Ec. Polinómica de la curva: $y = -0.034x^2 + 0.1646x - 0.021$

Los cuadros muestran los resultados del material adicionado con fibra de PET en una cantidad igual al 0.025%, 0.5%, 1%,1.4% del peso seco del material, los datos resultantes son prácticamente diferentes a los del material convencional, alterándose en un 4.2% para 0.025 en peso, 11.1% para la cantidad de 0.5%, 9.6% para un peso de 1% y un aumento de 2.9 % para un peso de 1.4% en el CBR.

Cabe resaltar que la adición de fibras de PET en porcentajes mayores al 1% hace difícil obtener una mezcla homogénea y una interacción adecuada entre el suelo y la fibra. Esto es porque las fibras empiezan a interactuar entre ellas haciéndole perder resistencia a la probeta. Como se puede observar en la figura, la mezcla no es homogénea y las fibras se juntan entre ellas inadecuadamente.

Los ensayos de CBR sin fibra se realizaron con la misma energía de Proctor Modificado. Finalmente los resultados de esfuerzo - deformación permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

Resultados de la cantidad óptima de fibras de PET para el suelo: Para el suelo de San Miguel (Arcilla limosa OL-CL) la adición de fibra de PET en 0.5% en peso de suelo compactado dio el mejor resultado, debido a que el suelo reforzado con fibra de PET presento una mayor resistencia a la compresión.



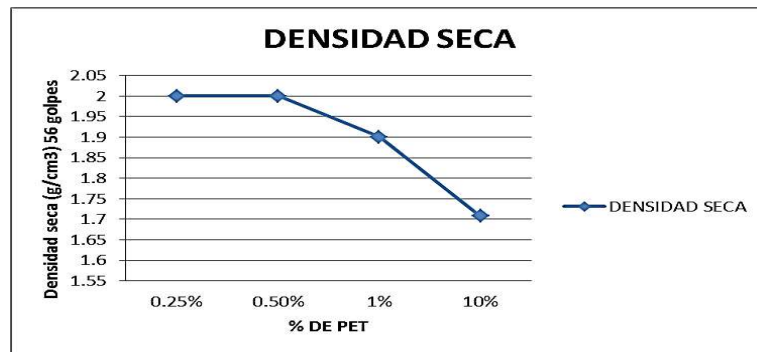
4.10.6 RESUMEN DENSIDAD SECA DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET AL 0.025%, 0.5%, 1%, 1.5% CON ANCHO DE 0.4 mm Y LONGITUD DE 5 cm.

Tabla 4.35. Resumen de densidades secas para el material con diferentes cantidades de PET.

MATERIAL CONVENCIONAL	
Densidad seca (g/cm ³) 56 golpes	
0.25 % de PET	2.00
0.5 % de PET	2.00
1 % de PET	1.90
1.5 % de PET	1.708

Fuente: propia

Figura 4.58 grafica de Densidad Seca versus cantidad de la fibras del PET.



Fuente: propia

La mayor densidad seca del suelo que se obtiene es sin la fibra de PET, y el de menor valor de densidad seca es al 1.5 % de adición de fibras de PET, y en la figura 4.58, se puede apreciar que la relación entre la densidad seca y el porcentaje en peso de la fibra de PET es inversamente proporcional, en el cual se muestra una disminución de la densidad seca a medida que aumenta la adición de fibras de PET, por eso ya no es aplicable la estabilización del suelo a mayores cantidades de fibras de PET de 1 %, es porque la mezcla de fibra de PET con el suelo ya no es uniforme y también por la baja densidad que tiene la fibra de PET.



4.11 ENSAYOS DE CBR DE SUELO REFORZADA CON ADICIÓN DE LA FIBRA DE PET CON DIFERENTES ANCHOS.

A continuación se muestra los resultados de los ensayos CBR del suelo **San Miguel** variando el ancho de la fibra de PET.

SUELO SAN MIGUEL – SAN SEBASTIÁN – CUSCO.

Tabla 4.36. Ensayo CBR del material de San Miguel con adición de PET con ancho 0.25 mm y 0.5%

RESULTADOS				
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.028			CBR AL 95% DE MDS = 9.5%
HUMEDAD OPTIMA (%)	6.44%			CBR AL 100% DE MDS = 16.8%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.		VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.72
56 GOLPES	0.17%	0.84%		
25 GOLPES	0.22%	3.64%		
12 GOLPES	0.30%	6.51%		

Fuente: Propia.

Tabla 4.37. Ensayo CBR del material de San Miguel con adición de PET con ancho 0.4 mm y 0.5%

RESULTADOS				
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.00			CBR AL 95% DE MDS = 10.3%
HUMEDAD OPTIMA (%)	6.44%			CBR AL 100% DE MDS = 17.7%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.		VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.72
56 GOLPES	0.05%	0.79%		
25 GOLPES	0.22%	1.61%		
12 GOLPES	0.30%	6.62%		

Fuente: Propia.



Tabla 4.38. Ensayo CBR del material de san miguel con adición de PET con ancho 1mm y 0.5%

RESULTADOS				
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	1.898			CBR AL 95% DE MDS = 4.3%
HUMEDAD OPTIMA (%)	6.44%			CBR AL 100% DE MDS = 6.3%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.		VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.81
56 GOLPES	0.02%	1.54%		
25 GOLPES	0.26%	3.41%		
12 GOLPES	0.39%	4.77%		

Fuente: Propia.

Tabla 4.39. Ensayo CBR del material de san miguel con adición de PET con ancho 1.4mm y 0.5%

RESULTADOS				
MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	1.919			CBR AL 95% DE MDS = 3.3%
HUMEDAD OPTIMA (%)	6.44%			CBR AL 100% DE MDS = 5.1%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.		VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.71
56 GOLPES	0.07%	1.46%		
25 GOLPES	0.72%	2.49%		
12 GOLPES	1.02%	5.25%		

Fuente: Propia.

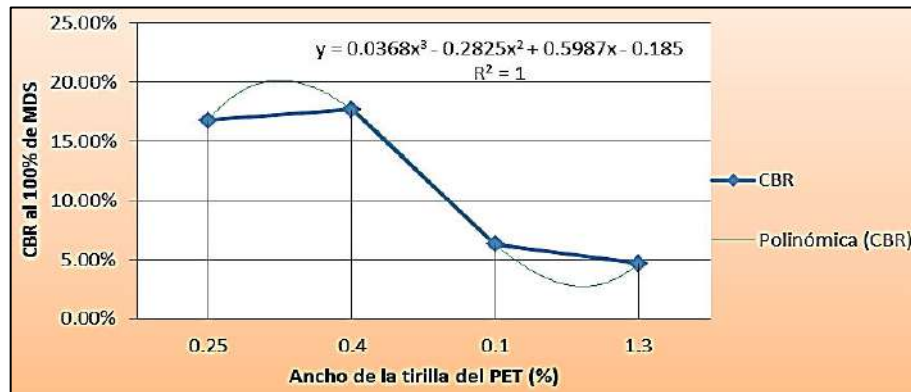
4.12 RESUMEN DE ENSAYO CBR DEL MATERIAL DE SAN MIGUEL CON ADICIÓN DE PET DE UN ANCHO DE 0.25mm, 0.4 mm, 1mm, 1.4mm Y CON UNA CANTIDAD OPTIMA DE 0.5%, DE LONGITUD DE 5 cm

Tabla 4.40 CBR para el material reforzado con fibra de PET.

MATERIAL CON PET		
CBR (%) 56 GOLPES		
	CBR al 100%de MDS	CBR al 95 %de MDS
0.25 mm de PET	16.8 %	9.5 %
0.4-0.5 mm de PET	17.7 %	10.3 %
0.1 mm de PET	6.3 %	4.3 %
1.3-1.4 mm de PET	4.7%	3.2%

Fuente: Propia.

Figura. 4.59. Grafica CBR versus ancho de la fibras del PET.



Fuente: Propia.

Ec. Polinómica de la curva: $y = 0.0368x^3 - 0.2825x^2 + 0.5987x - 0.185$

Se puede apreciar que la relación entre el CBR y la densidad seca, con suelo adicionando con fibra de PET con ancho de 0.25 mm y 0.5%, se incrementó en 10.2 %, y para un ancho de 0.5mm y 0.5% se incrementó en un 11.1% de CBR, y para los anchos 1mm y 1.3 mm ambos con 0.5% en cantidad se vio que no se incrementó al contrario empeoro los resultados de CBR con respecto al CBR del material natural, en la máxima densidad seca.

Los resultado son distorsionados por el ancho de las fibras por que a mayor grosor las fibras de PET actúan como amortiguadores el cual no permite la compactación, se concluye que a anchos mayores a 1mm la adición del PET no es representativa ni aplicable.

4.13 DENSIDAD SECA DEL SUELO DE SAN MIGUEL - SAN SEBASTIÁN - CUSCO.

En los ensayos se determinó la densidad seca de cada una de las muestras, este parámetro es un indicador del grado de compactación de la subrasante en laboratorio y en el campo, es así que es de vital importancia conocer los valores y las relaciones que dicho parámetro posee con el % de fibras de PET añadido.



En la siguiente tabla y figura se dan a conocer los valores registrados y las tendencias encontradas a lo largo de la investigación.

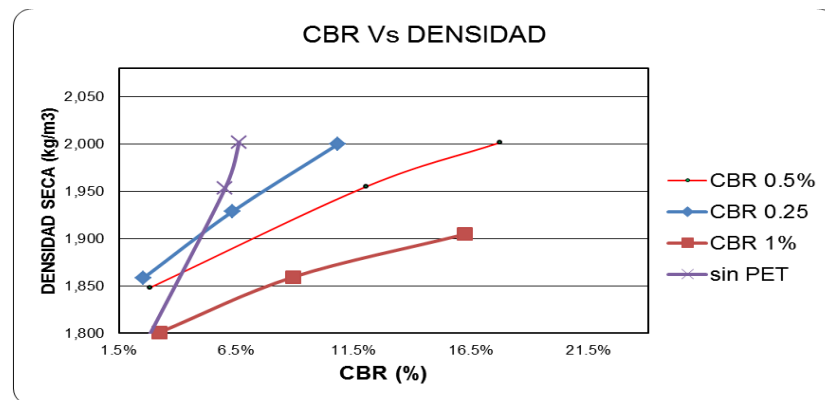
TABLA 4.41 Densidad seca en cada porcentaje de fibras de PET.

DENSIDAD SECA (gr/cm ³)			
	56 golpes	25 golpes	12 golpes
0% de fibras de PET.	2,002	1,953	1,785
0.25% de fibras de PET	2.000	1,928	1,858
0.5% de fibras de PET	2,001	1,955	1,848
1% de fibras de PET	1,905	1,859	1,801
1.5 % de fibras de PET	1.708	1.673	1.642

Fuente: Propia.

De la tabla 4.41 podemos ver que la mayor densidad seca alcanzada es en todos los casos es el de 56 golpes de compactación y es del suelo natural sin adición de fibra de PET, mientras el de menor valor es del suelo de 1.5% de adición de fibras de PET, es porque la mezcla de fibra de PET es dificultosa con el suelo; no es uniforme y también por la baja densidad de la fibra de PET.

Figura 4.60 Resumen de las relación CBR – Densidad Seca de los diferentes suelos.



Fuente: Propia.



En la figura 4.60 se puede apreciar la relación entre la densidad seca y el CBR respecto al porcentaje de adición de fibras de PET, que tienen una relación inversamente proporcional, se muestra una disminución de la densidad a medida que aumenta la adición de fibras de PET, vemos la variación de la densidad seca, por eso ya no es aplicable la estabilización del suelo a mayores cantidades de fibras de PET de 1 % por qué la mezcla del suelo y la fibra de PET no es uniforme.

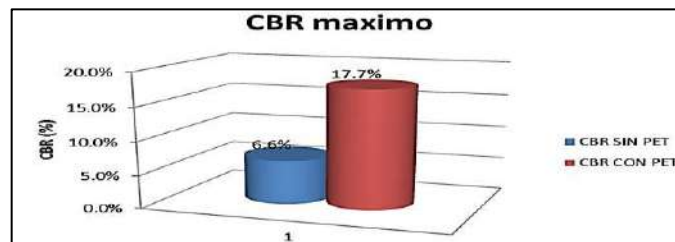
4.14 ANALISIS Y CONFRONTACIÓN DE RESULTADOS DE CBR CON FIBRA DE PET Y SIN FIBRA DE PET DE LOS SUELOS: SAN MIGUEL, HUANCARO, PATA PATA Y OSCOLLO PAMPA.

En este capítulo se hace una comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de CBR realizados a cada uno de los suelos en su estado natural y con los suelos reforzados con fibra de PET, con la adición de 0.5% en peso de fibra de PET y ancho óptimo de 0.4mm de fibras de PET.

A continuación se hace una comparación entre los esfuerzos máximos de cada suelo sin fibra de PET y con él % óptimo de fibra de PET.

a) Confrontación de resultados de CBR con fibra de PET y sin fibra de PET del suelo San Miguel.

Figura 4.61 Gráfica comparativa de CBR sin y con fibra de PET del suelo San Miguel (Arcilla limosa inorgánica de mediana plasticidad - CL).

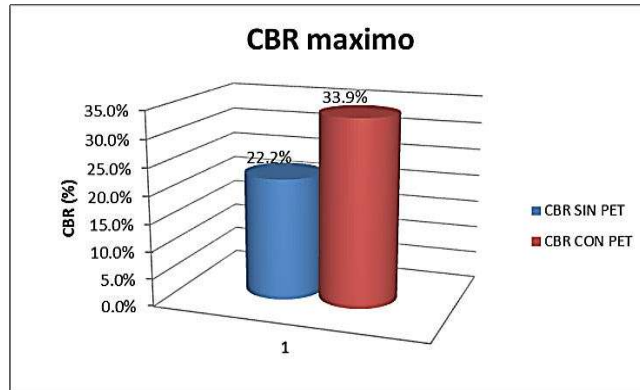


Fuente: propia



b) Confrontación de resultados de CBR con fibra de PET y sin fibra de PET del suelo Huancaro.

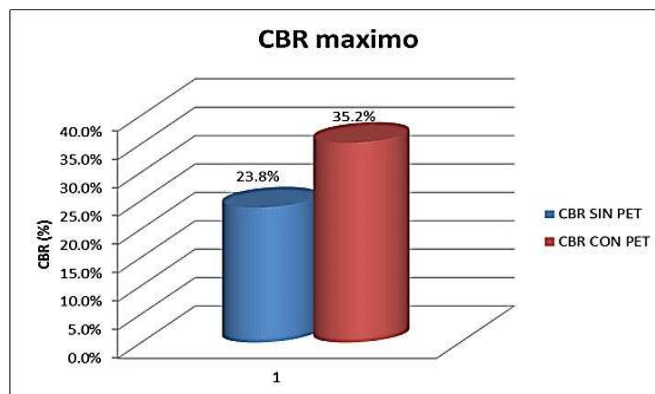
Figura 4.62. Gráfica comparativa CBR sin y con fibra de PET del Suelo Huancaro (SM (Arenas limosas, mezcla de arena y limo) - SC (Arenas arcillosas)).



Fuente: propia

c) Confrontación de resultados de CBR con fibra de PET y sin fibra de PET del suelo Pata Pata.

Figura 4.63. Gráfica comparativa CBR sin y con fibra de PET del suelo Pata Pata, (Limo arenosos o arcilloso ligeramente plásticos con grava CL – ML).

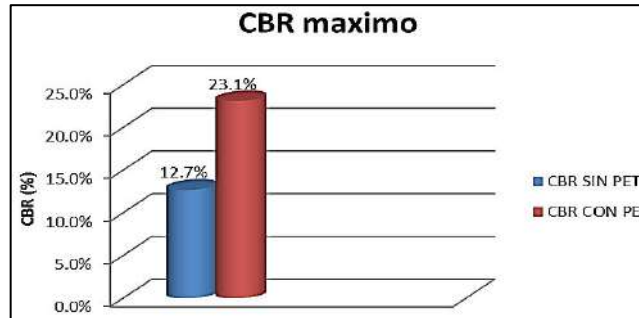


Fuente: propia



d) Confrontación de resultados de CBR con fibra de PET y sin fibra de PET del suelo Oscollo Pampa.

Figura 4.64. Gráfica comparativa de CBR sin fibra de PET y con fibra de PET del suelo Oscollo Pampa, (Arcilla arenosa o arcillas limosas pobres – CL).



Fuente: propia

Para cada tipo de suelo se puede ver que la adición de fibra de PET en su porcentaje óptimo, aumenta significativamente la resistencia del suelo a la compresión aumentando alrededor de 10 a 11% de CBR.

4.15 RESUMEN CONFRONTACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO CBR DE LOS DIFERENTES SUELOS.

A continuación se hace una comparación del CBR máximo sin fibra y con la adición del % óptimo de fibra de PET para cada suelo y para ver el incremento o disminución del CBR.

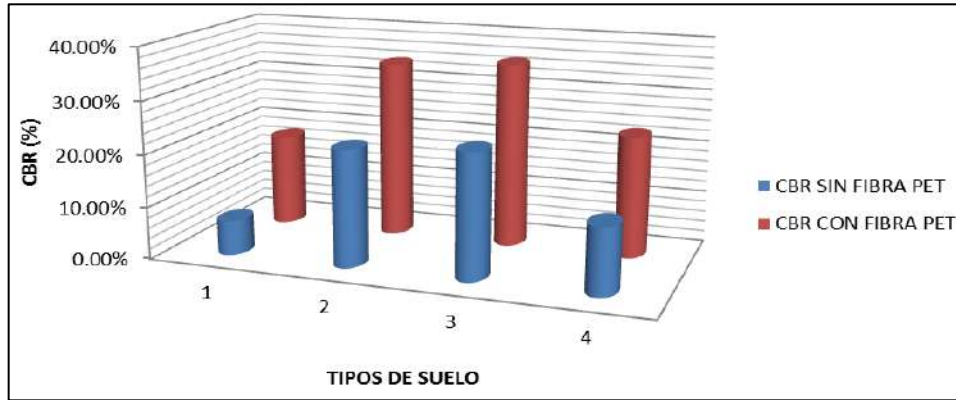
Tabla 4.42. Resumen de ensayo de CBR con fibra y sin fibra de PET de cada suelo.

TIPO DE SUELO	CBR sin fibra.	CBR con fibra.	% incrementado.
1 SAN MIGUEL	6.6 %	17.7 %	11.10%
2 HUANCARO	22.2 %	33.9 %	11.70%
3 PATA PATA	23.8 %	35.2 %	11.40%
4 OSCOLLO PAMPA	12.7 %	23.1 %	10.40%

Fuente: Propia.

De la tabla 4.42 se muestra el resumen en la gráfica siguiente:

Figura 4.65. Gráfica comparativa CBR sin y con fibra de PET de los diferentes tipos de suelo.



Fuente: Propia.

Como podemos ver en todos los suelos, el CBR aumenta en un promedio de 10%, cumpliendo con los objetivos planteados en el mejoramiento de suelos para subrasante de carretera.

En el suelo Areno Limoso el incremento de CBR es notable y el segundo en incrementarse su CBR es del suelo Limo arenosos arcilloso ligeramente plásticos con grava de Pata Pata y el que menos aumento es el suelo de Oscollo Pampa y luego fue el suelo Arcilla limosa inorgánica de mediana plasticidad de San Miguel.

TABLA 4.43. Expansión del suelo con y sin fibra.

MATERIAL NATURAL Y CON FIBRA DE PET			
Porcentaje de Expansión (56 GOLPES)			
	CBR con fibra	CBR sin fibra	% de diferencia
SAN MIGUEL	0.05 %	0.17 %	0.12%
HUANCARO	0.04%	0.04 %	0.00%
PATA PATA	0.02 %	0.05 %	0.03%
OSCOLLO PAMPA	0.43%%	0.52 %	0.09%

Fuente: Propia.



Se puede observar de los resultados de la tabla 4.43 que el porcentaje de expansión en todos los suelos disminuye.

En cuanto a la expansión de los suelos trabajados, se notó que son poco expansibles y con el cual podemos ver el efecto de la adición de fibra de PET en el suelo, por lo que podemos distinguir la baja expansión de los suelos de Huancaro y Pata Pata que sus expansiones se mantienen casi constantes, puesto que la expansión del suelo sin fibra de PET es entre 0.04% a 0.02% y también para el suelo con fibra de PET, y de los suelos de San Miguel y Oscollo Pampa se puede ver una mayor expansión no considerable que los otros suelos dándonos las siguientes lecturas del deformímetro de 0.17% y 0.52 % respectivamente.

4.16 DISCUSIÓN:

¿La granulometría que se usó en el diseño de la Subrasante cumple con las condiciones establecidas en las normas peruanas para el diseño de Subrasante?

El análisis granulométrico de un suelo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función de su tamaño.

Los suelos Arena limoso pobre en arcilla SC - SM (Huancaro), arcilla arenosa ó arcillas pobres CL (Oscollo Pampa), arcilla limosa inorgánica de mediana plasticidad CL (San Miguel- San Sebastián), no cumple con los requisitos del MTC por no tener una gradación requerida, para esto se utilizó las fibras de PET para mejorar el suelo.

El material, limo arenosos o arcilloso con grava CL-ML con grava (Pata Pata), tiene una gradación regular por eso tiene un CBR muy buena, no requiere mejorar pero para fines de investigación y poder entender la



interacción de las fibras de PET para este suelo se realizó una prueba de CBR con adición de las fibras de PET.

Para el suelo Arena limoso pobre en arcilla SC - SM (Huancaro) también tiene un CBR muy buena también se realizó las pruebas de CBR para ver el comportamiento de las fibras de PET con este tipo de suelos.

¿Existe una máxima cantidad de adición de fibras de PET?

Para los suelos San Miguel y Ocollo Pampa, la principal mejora fue de 11.1% y 10.40% respectivamente, para una cantidad optima en peso de 0.5% de fibras de PET, con longitud de 5 cm y con ancho de 0.4 mm. Con la adición de fibra de PET a un peso mayor de 1% va bajando la mejoría del suelo de su CBR, porque el mezclado del suelo con las fibras de PET no es uniforme, por lo que no es recomendado.

¿Existe una mínima cantidad de adición de fibras de PET?

Con la adición de 0.025% de fibras de PET, la variación de la capacidad de soporte del suelo aumenta en 4.2 % el cual mejora regularmente, pero la tendencia de la gráfica al disminuir la cantidad de fibras de PET tiene una tendencia a disminuir el CBR.

¿En función a que variable, se dosifico la fibras de PET?

Los porcentajes de la cantidad de fibras de PET se dosificaron con respecto al peso seco del material de subrasante.

¿Qué relación guardan los resultados de la densidad seca de las muestras con el porcentaje de fibras de PET?

La densidad del material y el porcentaje de adición de fibras de PET tienen una relación inversamente proporcional, es decir que, la densidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de adición de fibras de PET por encima de 1%.



¿Qué relación guarda el contenido de humedad por la expansión de los suelos compactados con el porcentaje de fibras de PET?

El colocado de los contrapesos en la muestra de suelo con el molde, es para simular una intensidad de carga igual a la masa de la sub-base y base por encima de la superficie. Para saber el libre acceso de agua a la parte superior e inferior de la muestra.

La relación entre la adición de fibras de PET y el contenido de humedad con la expansión del material, se vio que a un porcentaje mayor a 1% de adición de fibras de PET no se puede compactar, y se tiene también un incremento en el contenido de humedad por la expansión del material por la prueba de saturación, esto por la mala compactación.

¿Esta técnica, podría utilizarse en la capa de una subbase en la estructura de un pavimento?

Si la diferencia entre la capa subrasante y subbase de la estructura de un pavimento es su calidad, entonces las fibras de PET si se podrían utilizarse, pero para materiales con CBR de suelo natural mayores a 30%, para poderlos mejorar y así cumplir los requerimientos de una subbase.

¿Esta técnica, podría utilizarse para suelos friccionantes?

En nuestra investigación se utilizó materiales Arena limoso pobre en arcilla SC - SM (Huancaro), que funcionó correctamente, por consiguiente si se utiliza para suelos friccionantes, debido a que la rugosidad, hace que sea más fijado o unido, de darse el caso es recomendado una investigación al respecto.

¿Los trabajos con fibras de PET son dañinos para la salud?

La bibliografía indica que usando las medidas de protección necesarias la trabajar con fibras de PET, este material no causa ningún tipo de enfermedad o secuela en la salud; (artículo de salud sobre las fibras de PET)



¿Con esta aplicación de fibras de PET, se puede atender la falla por fatiga?

La falla por fatiga está en la carpeta asfáltica y no en el resto de la estructura del pavimento, sin embargo la forma de agregar la fibras de PET o fibras de vidrio al asfalto, podrían ayudar en la reacción frente a los esfuerzos para tracción que causan la falla por fatiga, se recomienda realizar la investigación con esta hipótesis.

¿La aplicación de la fibra de PET, aumentara la energía elástica potencial de la estructura del pavimento?

Para medir la diferencia de la energía elástica es necesaria la prueba del módulo resiliente, sin embargo actualmente existen relaciones matemáticas que permiten medir la energía elástica mediante el número de CBR siendo esta relación directamente proporcional. Es así que al aumentar el CBR de la muestra, también aumentara el módulo resiliente.



CONCLUSIONES:

La investigación realizada da como resultado que la fibra de PET es un excelente material para reforzar y mejorar las propiedades resistentes de los suelos finos-granulares debido al gran aumento de la resistencia al corte, se mejoró la resistencia mecánica o la capacidad de carga del suelo CBR para fines de subrasante y se tomó las siguientes conclusiones:

Conclusión 1. Se logra demostrar la hipótesis general, al incorporar las fibras de PET para un suelo fino para fines de subrasante, en el cual se logró aumentar su capacidad de soporte (CBR), sin embargo este incremento se limita a porcentajes menores al 0.25% de fibras de PET y a porcentajes mayores a 1% de fibras de PET y también se limita a mayores anchos de 0.5 mm de las fibras de PET.

Conclusión 2. Se logró cumplir con el objetivo específico N° 01 y demostrar la hipótesis secundaria N° 1 de manera que con la adición de fibras de PET consiguiente en la investigación; ya que fue el objetivo de encontrar el ancho de fibras de PET más óptimo, siendo el ancho óptimo de 0.4 mm, para la estabilización de la subrasante para que cumpla los requerimientos normados por el Reglamento Peruano.

Conclusión 3. Se logra cumplir con el objetivo específico N° 02 y demostrando la hipótesis secundaria N° 02, en la que se determinó la cantidad optima de fibras de PET, que tienen que ser mezcladas con los 4 suelos seleccionados del Cusco, que han sido mejorados su resistencia mecánica o la capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada, siendo el porcentaje óptimo de adición de fibras de PET en 0.5%.

Conclusión 4. Se logra cumplir con el objetivo específico N ° 3 y demostrar la hipótesis secundaria N° 3, se determinó las características de los suelos seleccionados del Cusco que son ideales para conseguir la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material



de sub rasante mejorada el suelo que dio mejores resultados, fue del suelo Limo arenosos o arcilloso ligeramente plásticos con grava CL-ML de Pata Pata.

Los otros suelos de propiedades y características adecuadas, para ser mejorados y usado como material de subrasante son:

Arena limoso o arenas arcillosas SC - SM (Huancaro), arcilla arenosa ó arcillas pobres CL-ML (Oscollo Pampa), arcilla limosa inorgánica de mediana plasticidad CL (San Miguel- San Sebastián), cumplen con las características para ser mejorados con la adición de fibras de PET.

Otras Conclusiones:

Conclusión 5. También se logró encontrar la relación de la densidad del material y el porcentaje de adición de fibras de PET, que tienen una relación inversamente proporcional es decir que la densidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de adición de fibras de PET pero a porcentajes mayores a 1% no es recomendable debido a que disminuye la estabilización del suelo.

Conclusión 6. Para el ensayo de Límite líquido de suelos con **fibras de PET**, se tuvo que tener mucho cuidado para conseguir la humedad óptima a los 25 golpes del ensayo. En el cual se observó que la cohesión entre las partículas del suelo y la fibra de PET, se generan fuerzas entre ellos que los ligan; estas fuerzas de cohesión son varias: las fuerzas de Van der Waal, y a la fricción asociadas al efecto borde; cara entre los granos y la superficie de las fibras de PET.

Conclusión 7. Del ensayo del Límite plástico; no se pudo realizar la prueba de límite plástico de la muestra de suelo reforzado con fibras de PET para saber su cohesión, porque no se puede realizar rollitos con el material de la fibra de PET.

Conclusión 8. Los suelos pobres del cusco que necesitan ser estabilizados son similares al suelo San Miguel, con un CBR al 95% de MDS = 4.8% y con CBR al 100% de MDS = 6.6% y debe ser estabilizado con Tereftalato de Polietileno –



PET para conseguir un aumento de la capacidad de carga CBR, en la Subrasante para carreteras:

- El CBR del suelo mejorado de San Miguel con fibra de PET en una pulgada de penetración es de CBR AL 95% DE MDS =10.3% y CBR AL 100% es de MDS = 17.7%
- La densidad seca máxima para la compactación es de 2.0 gr/ cm³
- El suelo compactado con 56 golpes, después de la saturación con agua tubo la disminución de la expansión del suelo de 0.17% a 0.05%.

Conclusión 9.

- Del análisis económico de la estabilización del suelo natural sin fibra de PET para la subrasante en carretera por m³. Comparando con la estabilización con fibra de PET, cemento Portland y cal, se demuestra que la estabilización con fibra de PET resulta más económica que las otras estabilizaciones de suelo natural sin fibra de PET, con Cemento Portland y Cal, como se demuestra a continuación:
- Se puede ver que la estabilización del suelo con cal es de 8.22 % más costoso que la estabilización del suelo sin fibra de PET, también podemos ver la estabilización con cemento que es de 4.89 % menos costoso que la estabilización de suelo natural sin fibra de PET.
- Se puede ver también que la estabilización con fibra de PET es de 24.94 % menos costosa que la estabilización del suelo natural sin fibra de PET.
- Y también podemos ver que los espesores de las capas subrasante, sub base granular, base granular y espesor de capa asfáltica varían del tipo de estabilización. Debido a que cada tipo de estabilizante, sirve para un tipo de suelo.



RECOMENDACIONES:

Una de las principales dificultades en la realización del ensayo es en el momento de mezclar el suelo con las fibras de PET a porcentajes mayores a 1% de fibras de PET, asimismo por su baja densidad origina la disminución de la densidad del suelo y también se limita a mayores anchos de 0.5 mm de las fibra de PET, es muy importante realizar una mezcla muy homogénea entre el suelo y la fibra de PET para obtener una mejor interacción entre ambos, para mejorar su resistencia, en el cual se debe tener bastante cuidado al momento de compactar por capas, para no alterar los resultados o es mejor repetir los ensayos para sacar un promedio.

A la hora de realizar el ensayo de penetración con la prensa CBR debe calibrarse adecuadamente, así como los otros equipos del laboratorio utilizados para las pruebas deben ser calibrados debidamente.

Se recomienda hacer un estudio económico de la fibra de PET comparando con otros métodos de estabilización, para obtener una relación costo - beneficio y de esta manera sustentar el beneficio económico que recomendamos a continuación:

Se recomienda la estabilización SUELO – PET: Es para suelos arcillosos plásticos, suelos arcillo limosos, también mejora suelos grava arenosos, suelos arcillo arenosos.

Se recomienda la estabilización SUELO – CEMENTO: Para suelos arcillo arenosos, suelos grava arenosos, suelos arcillosos resulta más complicado al mezclar cementos con arcillas suaves y húmedas. Requiere pre tratamiento con cal.

Se recomienda la estabilización SUELO – CAL: Disminuye el índice de plasticidad de suelos plásticos, suelos arcillo limosos, suelos grava arenosos, suelos arcillo arenosos, suelos arena uniforme.



BIBLIOGRAFIA

1. Rico Rodríguez, Alfonso. (2005). La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. México: Editorial Limusa.
2. Braja M. Das. (5^{ta} edición). (2001). Principios de Ingeniería Geotécnica. California USA: Editorial, Int. Thompson.
3. Braja M. Das. (7^{ma} edición). (2001). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. California USA: Int. Thompson Editores.
4. Carlos Crespo Villalaz. (1979). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Editorial Limusa.
5. Carlos kraemer, José María Pardillo. (2004). Ingeniería de carreteras, Volumen II. España: Ed. Mc Graw Hill /interamericana.
6. J. A, JIMENEZ SALAS, J. L. de JUSTO ALPAÑES. (2^{da} Edición). (1975). Geotecnia y Cimientos I, Propiedades de los Suelos y de las Rocas. Madrid: Editorial Rueda.
7. Joseph E. Bowles. (1982). Propiedades Geofísicas de los Suelos. USA: Ed. Mc Graw Hill.
8. Joseph E. Bowles. (1982). Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. USA: Ed. Mc Graw Hill.
9. Juárez Badillo Y Rico Rodríguez. (2005). Mecánica de Suelos Tomo I. México.
10. Luis I. González de Vallejo, Mercedes Ferrer. (2002). Ingeniería Geológica, Madrid.
11. Manual de Carreteras: Suelos, Geología. (2013). Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos, MTC. Perú.
12. Matilde González Caballero. (1^{ra} edición). (2001). El terreno, Universidad Politécnica de Catalunya.
13. MTC (Ministerio de Transporte y Comunicaciones). (2000). Especificaciones técnicas generales Especificaciones técnicas generales para la construcción de carreteras EG - 2000. Lima - Perú.
14. Peter L. Berry & David Reid. (1993). Mecánica de Suelos. UK: Ed. Mc. Graw Hill International SA.



15. Terzaghi K. Y Peck R. (1970). Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. Argentina: Edit. Ateneo.
16. T. William Lambe y Robert V. Whitman. (2006). Mecánica de suelos. México: Editorial Limusa.
17. Liliana Muñoz Pérez. (2012). Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) Como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga. (Tesis). Universidad Nacional Autónoma de México.

PÁGINAS WEB DE CONSULTA:

<http://es.slideshare.net/angeldsoloyo/a1-compactación-desuelos>
http://www.ityac.com.ar/Files/A1_Compactación_de_Suelos.pdf
http://delegacion.caminos.upm.es/apuntes/ICCP/4_cuarto/Geotecnia/MECÁNICA_DEL_SUELO-1.pdf
http://1.bp.blogspot.com/_RfXS8XXEygw/TO5tEcEyzHI/AAAAAAAAAIE/YMbDxGgQ9r0/s1600/lp+proced.jpg
www.rafaela.inta.gov.ar
http://m.exam-10.com/pars_docs/refs/20/19805/19805_html_m4482586.png
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.pe/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html>
<http://icasasecologicas.com/15-fotos-de-casas-hechas-con-botellas/>
<http://vilssa.com/ladrillos-de-plastico-reciclado>
<http://www.universoarquitectura.com/la-arquitectura-sustentable-y-los-nuevos-materiales/>
http://archivo.lavoz.com.ar/nota.asp?nota_id=162789
<http://mariosergioramirezablah.mx/ramirez-zablah-sustentabilidad/>
<http://www.quiminet.com/articulos/proceso-de-produccion-del-pet-2561170.htm>
http://www.cpme-pet.org/sites/default/files/Flake_Pellet_Preform_Bottle.jpg
<http://image.slidesharecdn.com/peletizadodepolmeros-130805185858-phpapp01/95/peletizado-de-polmeros-10-638.jpg?cb=1375729182>
<http://www.interempresas.net/FotosArtProductos/P78213.jpg>
http://publicaciones.ua.es/filespubli/pdf/63819259788497172325_Fragmento.pdf
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.pe/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
<http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/buenas-practicas-manufacturas-pet/image005.jpg>
http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/tipos_de_pet.htm
http://4.bp.blogspot.com/_9S2ArRmGS_k/T8l0gxVD5PI/AAAAAAAAAac/zUzVas_xlSM/s1600/PET+1.jpg
<http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>
https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3235/53324-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



UAP

Tesis: Estabilización de suelos con fibra de Tereftalato de Polietileno – PET probadas en diferentes suelos del Cusco para conseguir un aumento de la capacidad de carga CBR, en la subrasante para carreteras
Autor: Bach. Ferdinan Ccorimanya Apaza / Asesor: Ing. Giancarlo Vincet Fernández Venero

ANEXOS

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA SECUNDARIO	OBJETIVO SECUNDARIO	HIPOTESIS SECUNDARIA	DE LA HIPOTESIS SECUNDARIA:	TIPO
<p>¿Cuál es el mejor ancho de las fibras de PET al ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, mejoran resistencia mecánica o capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada?</p> <p>¿Cuál es la cantidad de estas fibras de PET que tienen que ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, que mejoran la resistencia mecánica o la capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada?</p> <p>¿Cuáles son las características de los suelos del cusco que son ideales para conseguir la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada?</p>	<p>Determinar el mejor ancho de las fibras de PET al ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, que mejora la resistencia mecánica o capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada.</p> <p>Determinar la cantidad de estas fibras de PET que tienen que ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, que mejoran la resistencia mecánica o la capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada.</p> <p>• Determinar las características de los suelos del cusco que son ideales para conseguir la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Con el ancho óptimo de las fibras de PET al ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, mejoraría la resistencia mecánica o capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada. • Con la cantidad óptima de estas fibras de PET que tienen que ser mezcladas en forma aleatoria con los suelos del Cusco, mejoraría la resistencia mecánica o la capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada. • La selección adecuada de las propiedades y características de los suelos seleccionados del cusco que son ideales, se obtendría la máxima resistencia mecánica o la mayor capacidad de carga CBR, para ser usado como material de sub rasante mejorada. 	<p>- VARIABLES INDEPENDIENTES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ancho de las fibras de PET. • Cantidad de las fibras de PET • Propiedades del suelo. <p>- VARIABLE DEPENDIENTE:</p> <p>De la hipótesis principal: Capacidad de carga CBR.</p> <p>De la hipótesis secundaria: Capacidad de carga CBR.</p>	<p>INVESTIGACIÓN Aplicada.</p> <p>NIVEL Causal-Explicativo</p> <p>METODO: Experimental</p>

ANEXO Nº 2

ANÁLISIS ECONÓMICO

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

1.1 METODO AASTHO -93

Es uno de los métodos más utilizados y de mayor satisfacción a nivel internacional para el diseño de pavimentos es desarrollado en función a un método experimental.

1.2 FORMULACIÓN DE DISEÑO.

La ecuación básica de diseño a la que llegó AASHTO para el diseño de pavimentos para un desarrollo analítico, se encuentra plasmada también en nomogramas de cálculo, está esencialmente basada en los resultados obtenidos de la prueba experimental de la carretera.

1.3 FORMULA GENERAL AASTHO

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 2.0} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10}(MR) - 8.07$$

Dónde:

- W18 = Tráfico (Número de ESAL's)
- Zr = Desviación Estándar Normal
- So = Error Estándar Combinado de la predicción del Tráfico
- ΔPSI = Diferencia de Serviciabilidad (Po-Pt)
- Po = Serviciabilidad Inicial
- Pt = Serviciabilidad Final
- Cd = Coeficiente de Drenaje
- K = Módulo de Reacción de la Sub Rasante en (psi).
- MR = Modulo Resiliente
- SN = CALCULO DE NUMERO ESTRUCTURAL

2.- VARIABLES DE DISEÑO

2.1 ESPESOR (D)

El espesor del pavimento flexible, es la variable “D” que pretendemos determinar al realizar un diseño de pavimento El resultado del espesor se ve afectado por todas las demás variables que interviene en los cálculos. Es importante especificar lo que se diseña, ya que a partir de espesores regulares una pequeña variación puede significar una variación importante en la vida útil.

2.2 TRAFICO (W18).

El método AASTHO diseña los pavimentos de concreto por fatiga. La fatiga se entiende como el número de repeticiones ó ciclos de carga que actúan sobre un elemento determinado. Al establecer una vida útil de diseño, en realidad lo que se esta haciendo es tratar de estimar, en un periodo de tiempo, el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento. La vida útil mínima con la que se debe diseñar un pavimento es de 20 años, en la que además se contempla el crecimiento del tráfico durante su vida útil, que depende del desarrollo socio-económico de la zona.

2.3 TRAFICO ESAL's

$$ESAL's = TDP \times A \times B \times 365 \times \frac{(1+r)^n - 1}{Ln(1+r)} \times FC$$

Dónde:

ESAL`s = Número estimado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

TPD = Transito promedio diario inicial

A = Porcentaje estimado de vehiculos Pesados (buses camiones)

B = Porcentaje de vehiculos pesados que emplean el carril de diseño

r = Tasa anual de crecimiento de transito

n = Periodo de diseño

FC = Factor camión

TPD= 3000
 A= 15%
 B= 50%
 r= 1.30%
 n= 10 años
 FC= 2

NUMERO DE CARRILES	PORCENTAJE DE VEHICULOS PESADOS EN EL CARRIL DE DISEÑO	
	2	50
4	45	
6 a mas	40	
ESAL`s = 1,753,292.80		

2.4 FACTOR DE CRECIMIENTO DEL TRÁFICO (r)

El factor de crecimiento del tráfico es un parámetro que considera en el diseño de pavimentos, los años de periodo de diseño más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vía.

CASO	TASA DE CRECIMIENTO
Crecimiento Normal	1% al 3%
Vías complet. saturadas	0% al 1%
Con trafico inducido	4% al 5%
Alto crecimiento	mayor al 5%
r = 3.0%	

2.5 PERÍODO DE DISEÑO (Pd).

El presente trabajo considera un período de diseño de 20 años. (Recomendable)

$$Pd = 20.00$$

2.6 FACTOR DE SENTIDO (Fs).

Del total del tráfico que se estima para el diseño del pavimento deberá determinarse el correspondiente a cada sentido de circulación.

CIRCULACION	FACTOR
Un sentido	1.0
Doble sentido	0.5

$$Fs = 0.50$$

2.7 FACTOR CARRIL (Fc).

Es un coeficiente que permite estimar que tanto el tráfico circula por el carril de diseño.

No CARRIL		FACTOR CARRIL	
1		1.00	
2	0.80	a	1.00
3	0.60	a	0.80
4	0.50	a	0.75

$$Fc = 1.00$$

2.8 TRÁFICO ESAL's MODIFICADO

Es el Tráfico afectado por el Factor Carril y el Factor de Sentido que da como resultado el Trafico Esal's según las condiciones reales de la vía.

$$ESAL's = 876,646.40$$

3.- FACTORES DE EQUIVALENCIA DE TRÁFICO

Fórmulas que permiten convertir el número de pesos normales a ejes equivalentes los que dependen del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo del eje y de la serviciabilidad final que se pretende para el pavimento.

Tránsito esperado en el carril de diseño en millones de ejes equivalentes (W18)	Confiability (R)	Zr	So	Factor se Seguridad F.S.
< 5	50	0.000	0.35	1.00
5 - 15	50 - 60	0.000 - 0.253	0.35	1.00 - 1.23
15 - 30	60 - 70	0.253 - 0.524	0.35	1.23 - 1.83
30 - 50	70 - 75	0.524 - 0.674	0.34	1.51 - 1.70
50 - 70	75 - 80	0.674 - 0.841	0.32	1.64 - 1.86
70 - 90	80 - 85	0.841 - 1.037	0.30	1.76 - 2.05

3.1 CONFIABILIDAD:

Se denomina confiabilidad (R%) a la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. También se puede entender a la confiabilidad como un factor de seguridad, de ahí que su uso se debe al mejor de los criterios.

TIPO DE PAVIMENTO	CONFIABILIDAD
Autopistas	90%
Carreteras	75%
Rurales	65%
Zonas industriales	60%
Urbanas principales	55%
Urbanas secundarias	50%

$$R (\%) = 75.000$$

3.2 DESVIACIÓN ESTÁNDAR (Zr).

Es función de los niveles seleccionados de confiabilidad.

$$Zr = -0.674$$

DESVIACION ESTANDAR (Zr)

Confiabilidad R (%)	Desviac. Estand. (Zr)
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

3.3 ERROR ESTÁNDAR COMBINADO (So):

AASHTO propuso los siguientes valores para seleccionar la Variabilidad o Error Estándar Combinado So, cuyo valor recomendado es:

Para pavimentos	0.30 – 0.40
En construcción nueva	0.35

$$So = 0.45$$

3.4 SERVICIABILIDAD (Δ PSI):

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía. La medida primaria de la serviciabilidad es el Índice de Serviciabilidad Presente. El procedimiento de diseño AASHTO predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad (Δ PSI) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Como el índice de serviciabilidad final de un pavimento es el valor más bajo de deterioro a que puede llegar el mismo, se sugiere que para carreteras de primer orden (de mayor tránsito) este valor sea de 2.5 y para vías menos importantes sea de 2.0; para el valor del índice de serviciabilidad inicial la AASTHO llegó a un valor de 4.5 para pavimentos de concreto y 4.2 para pavimentos de asfalto.

INDICE DE SERVICIO	CALIFICACION
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo

Entonces:

$$P_o = 4 \quad \text{Serviciabilidad Inicial}$$

$$P_t = 2.0 \quad \text{Serviciabilidad Final}$$

$$\Delta \text{ PSI} = P_o - P_t$$

$$\Delta \text{ PSI} = 2.00$$

3.5 CALCULO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

Dónde:

a_i = Coeficiente de capa (pulg -1)

D_i = Espesor de la capa (pulg)

m_i = Coeficiente de drenaje de la capa (adimensional)

Sub indice 1 = Capa de carpeta asfáltica.

Sub indice 2 = Capa de Base

Sub indice 3 = Capa de Sub Base

Los coeficientes de capa dependen de Modulo Resiliente. Los coeficientes de capa más usados en la pista de prueba AASHO son:

Simbolo	Capa	Coeficientes de capa		
		Rango	Recomienda	Unidad
a1	Concreto asfáltico superficial	0.40 - 0.44	0.44	Pulg -1
a2	Base de piedra chancada	0.10 - 0.14	0.14	Pulg -1
a3	Sub Base de grava arenosa	0.06 - 0.10	0.10	Pulg -1

3.6 COEFICIENTES DE DRENAJE

Calidad de Drenaje	Retiro/agua en		% de tiempo de pavimento es expuesta a niveles de humedad próximas a la saturación			
			< 1%	1 - 5 %	5 - 25 %	> 25%
Excelente	2	Horas	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	2	Día	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Regular	2	Semana	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Pobre	2	mes	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy Pobre	El agua	no drena	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

El diseño del pavimento flexible es para un periodo de diseño 10 años, las condiciones de drenaje Bueno y Bueno para Base y SB, para base granular es 1 - 5 % y para sub base granular es 5 - 25 % considerando un nivel de serviciabilidad inicial de 4 y un final de 2. Con tráfico acumulado proyectado es 876646.40 ESAL en el carril de diseño. Se trata de una vía de poca importancia. El nivel de confiabilidad es de 75 %.

MODULO RESILIENTE EFECTIVO DEL SUELOS DE SUBRASANTE AASHO T 274, MTC – E128: Las propiedades mecánicas del suelo de la subrasante se caracterizan en AASHO 93 por el Módulo Resiliente M_r que mide las propiedades elásticas reconociendo sus características no lineales. Correlacionando con el CBR, con la ecuación: $M_r (\text{Psi}) = 2555 \times \text{CBR}^{0.64}$

MÓDULO RESILIENTE DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE.

- Para suelo natural sin aditivo $Mr (Psi) = 2555 \times (6.6)^{0.64} = 8548.7 \text{ psi}$
- Para suelo natural con fibra de PET $Mr (Psi) = 2555 \times (17.7)^{0.64} = 16073 \text{ psi}$
- Para estabilización de suelo con cal $Mr (Psi) = 2555 \times (26)^{0.64} = 20304 \text{ psi}$
- Para estabilización de suelo con cal cemento $Mr (Psi) = 2555 \times (30)^{0.64} = 22529 \text{ psi}$

Esta Ecuación es razonable para suelos de gradación fina con CBR menores que 10%.

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE PARA SUBRASANTE SUELO NATURAL CALCULO DE NÚMERO ESTRUCTURAL

SN requer = 2.85 Condición \rightarrow **5.943** = **5.9356**

Drenaje Base granular	Condición	Bueno	Expos. a humedad	1 - 5 %	m2 =	0.70
Drenaje Sub Base granular	Condición	Bueno	Expos. a humedad	5 - 25 %	m3 =	0.70

COEFICIENTES DE CAPAS

Capa	Elasticidad	CBR	Mod Resiliente	Coef de Capa		
Carpeta Asfáltica	450000 psi			a1=	0.44	Pulg -1
Base Granular		80%	42205.4462	psi	a2=	0.14
Sub Base Granular		25%	20048.0672	psi	a3=	0.10

De la tabla de espesores mínimos recomendados, para el tránsito son:

Espesor de la Carpeta Asfáltica $D1 = 2.5$ Pulg
 Espesor de la Base Granular $D2 = 6.0$ Pulg

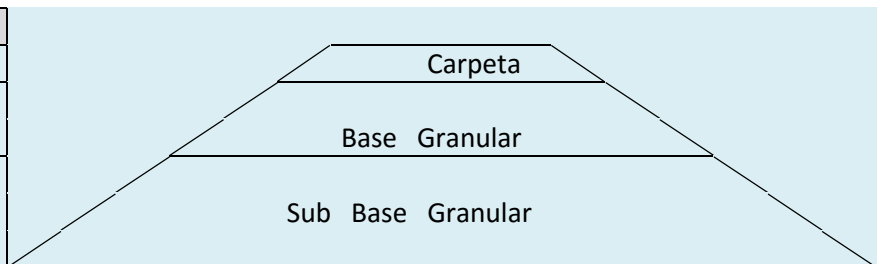
Reemplazando los valores de coeficiente de capa

$SN = a1 D1 + a2 D2 m2 + a3 D3 m3$

Espesor de Sub Base Granular Se asume **D3 = 19 Pulg**

$D3 = 19.09$ Pulg

1° tanteo	2° tanteo	3° tanteo	UND.
3.0	3.5	2.5	Pulg
6.0	6.0	4.0	Pulg
8.0	10.0	8.0	Pulg



Se asume la carpeta asfáltica cimentará sobre BASE GRANULAR con $Mr = 42205.44621 \text{ PSI}$

SN requer = 1.55 Condición \rightarrow **5.943** = **5.9481**

$SN = a1 D1$

$D1 = 3.523$ Pulg
 Se asume **D1 = 4 Pulg**

a1 = 0.44

Finalmente se asume SubBase Granular se cimenta sobre SUB RASANTE con Mr = 8548.68psi

SN requer = 3.70 Condición 6.683 = 6.6670

SN = a1 D1 + a2 D2 m2 + a3D3m3

D3 =	16.514	Pulg	Se asume	D3 =16 Pulg
SN =	3.70			
a1 =	0.44			
D1 =	4.00	Pulg		
a2 =	0.14			
m2 =	0.70			
a3 =	0.10			
m3 =	0.70			

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE PARA SUBRASANTE CON PET

CALCULO DE NÚMERO ESTRUCTURAL

SN requer = 2.26 Condición 5.943 = 5.9416

Drenaje Base granular	Condición	Bueno	Expos. a humedad	1 - 5 %	m2 =	0.70
Drenaje Sub Base granular	Condición	Bueno	Expos. a humedad	5 - 25 %	m3 =	0.70

COEFICIENTES DE CAPAS

Capa	Elasticidad	CBR	Mod Resiliente	Coef de Capa		
Carpeta Asfáltica	450000 psi			a1=	0.44	Pulg -1
Base Granular		80%	42205.4462	psi a2=	0.14	Pulg -1
Sub Base Granular		25%	20048.0672	psi a3=	0.10	Pulg -1

De la tabla de espesores mínimos recomendados, para el tránsito son:

Esesor de la Carpeta Asfáltica D1 = 2.5 Pulg
 Esesor de la Base Granular D2 = 6.0 Pulg

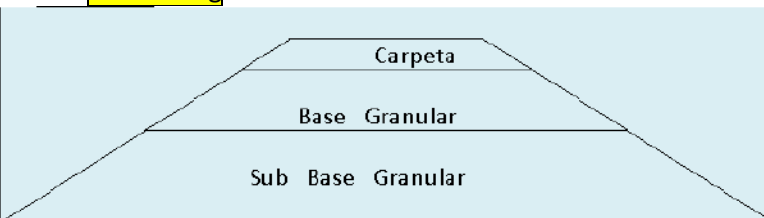
Reemplazando los valores de coeficiente de capa

SN = a1 D1 + a2 D2 m2 + a3 D3 m3

D3 = 9.397Pulg

Esesor de Sub Base Granular Se asume **D3 = 9 Pulg**

1° tanteo	2° tanteo	3° tanteo	UND.
3.0	3.5	2.5	Pulg
6.0	6.0	4.0	Pulg
8.0	10.0	8.0	Pulg



Se asume la carpeta asfáltica cimentará sobre BASE GRANULAR con Mr =42205.44621 PSI

SN requer = 1.60 Condición 5.943 = 6.0256

$SN = a_1 D_1$



D1 =	3.636	Pulg
SN =	1.60	
a1 =	0.44	

Se asume **D1 = 4 Pulg**

Finalmente se asume Sub Base Granular se cimienta sobre SUB RASANTE con $M_r = 16072.883$

psi **SN requer = 3.05**

Condición **6.747 = 6.7592**

$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$

D3 =	7.2286	Pulg
SN =	3.05	
a1 =	0.44	
D1 =	4.00	Pulg
a2 =	0.14	
m2 =	0.70	
a3 =	0.10	
m3 =	0.70	

Se asume **D3 = 7.229 Pulg**

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE PARA SUBRASANTE CON CAL

CALCULO DE NÚMERO ESTRUCTURAL

SN requer = 2.07 Condición



5.943 = 5.9441

Drenaje Base granular	Condición	Bueno	Expos. a humedad	1 - 5 %	m2 =	0.70
Drenaje Sub Base granular	Condición	Bueno	Expos. a humedad	5 - 25 %	m3 =	0.70

COEFICIENTES DE CAPAS

Capa	Elasticidad	CBR	Mod Resiliente	Coef de Capa		
Carpeta Asfáltica	450000 psi			a1=	0.44	Pulg -1
Base Granular		80%	42205.4462	psi a2=	0.14	Pulg -1
Sub Base Granular		25%	20048.0672	psi a3=	0.10	Pulg -1

De la tabla de espesores mínimos recomendados, para el tránsito son:

Espesor de la Carpeta Asfáltica $D_1 = 2.5$ Pulg

Espesor de la Base Granular $D_2 = 6.0$ Pulg

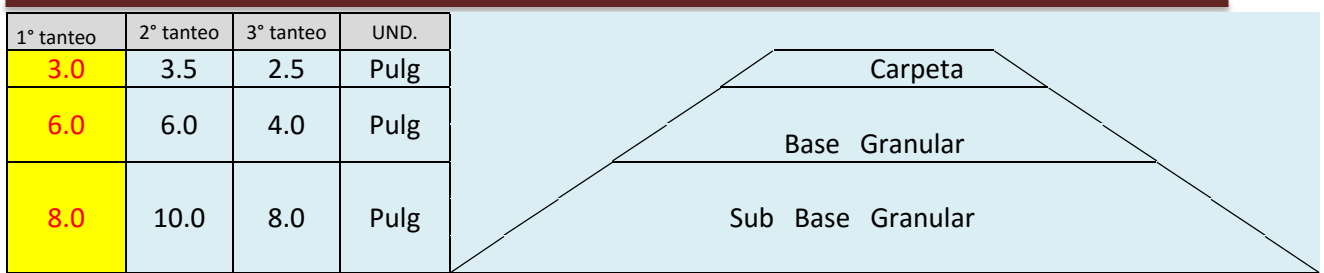
Reemplazando los valores de coeficiente de capa

$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$



D3 =	7.576 Pulg
------	------------

Espesor de Sub Base Granular Se asume **D3 = 8 Pulg**



Se asume la carpeta asfáltica cimentará sobre BASE GRANULAR con $M_r = 42205.44621$ PSI

SN requer = 1.55 Condición \rightarrow 5.943 = 5.9481

SN = $a_1 D_1$

D1 =	3.523	Pulg
SN =	1.55	Se asume D1 = 3.5 Pulg
a1 =	0.44	

Finalmente se asume Sub Base Granular se cimienta sobre SUB RASANTE con $M_r = 20303.77$ psi

SN requer = 2.80 Condición \rightarrow 791 = 6.7585

SN = $a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$

D3 =	6.8	Pulg	Se asume D3 = 7 Pulg
SN =	2.80		
a1 =	0.44		
D1 =	3.50	Pulg	
a2 =	0.14		
m2 =	0.70		
a3 =	0.10		
m3 =	0.70		

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE PARA SUBRASANTE CON CEMENTO

CALCULO DE NÚMERO ESTRUCTURAL

SN requer = 2.10 Condición \rightarrow 6.02 = 6.08

Drenaje Base granular	Condición	Bueno	Expos. a humedad	1 - 5 %	m2 =	0.70
Drenaje Sub Base granular	Condición	Bueno	Expos. a humedad	5 - 25 %	m3 =	0.70

COEFICIENTES DE CAPAS

Capa	Elasticidad	CBR	Mod Resiliente	Coef de Capa		
Carpeta Asfáltica	450000 psi			a1=	0.44	Pulg -1
Base Granular		80%	42205.4462	psi a2=	0.14	Pulg -1
Sub Base Granular		25%	20048.0672	psi a3=	0.10	Pulg -1

De la tabla de espesores mínimos recomendados, para el tránsito son:

Espesor de la Carpeta Asfáltica D1 = 2.5 Pulg
 Espesor de la Base Granular D2 = 6.0 Pulg

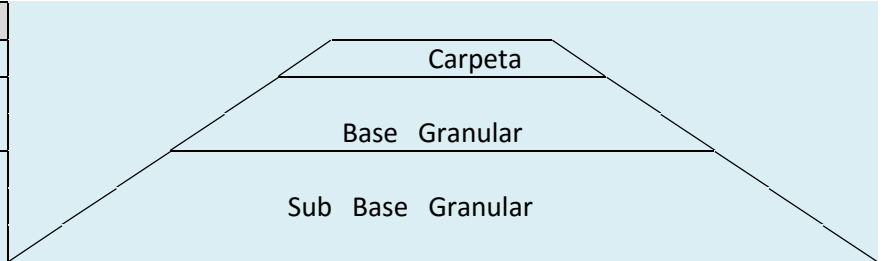
Reemplazando los valores de coeficiente de capa

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

Espesor de Sub Base Granular Se asume **D3 = 7 Pulg**

D3 = 6.769 Pulg

1° tanteo	2° tanteo	3° tanteo	UND.
3.0	3.5	2.5	Pulg
6.0	6.0	4.0	Pulg
8.0	10.0	8.0	Pulg



Se asume la carpeta asfáltica cimentará sobre BASE GRANULAR con $M_r = 42205.44621$ PSI

SN requer = 1.55 Condición $5.943 = 5.9481$

$$SN = a_1 D_1$$

D1 = 3.523 Pulg
 SN = 1.55 Se asume **D1 = 3.5 Pulg**
 a1 = 0.44

Finalmente se asume Sub Base Granular se cimienta sobre SUB RASANTE con $M_r = 22529.34$ PSI

SN requer = 2.75 Condición **6.837 = 6.8138**

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

D3 = 6.0857	Pulg	Se asume D3 = 6 Pulg
SN = 2.75		
a1 = 0.44		
D1 = 3.50	Pulg	
a2 = 0.14		
m2 = 0.70		
a3 = 0.10		
m3 = 0.70		

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE PET

TABLA ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE LA PRODUCCIÓN DE FIBRAS DE PET.

Presupuesto	1004001	ANALISIS ECONOMICO DE PRODUCCION DE PET								
Subpresupuesto	001	PRODUCCION DE FIBRAS DE PET						Fecha presupuesto		
PARTIDA	01.01	RECOLECCION DE LAS BOTELLAS DE PET								
Rendimiento	kg/DIA	MO.	60.0000	EQ.	60.0000		Costo unitario directo por : kg	0.85		
Código	Descripción Recurso			Unidad		Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
		Mano de Obra								
0101010005	PEON			hh		1.0000	0.133	6.41	0.85	
								0.85		
PARTIDA	02.01	LAVADO DE BOTELLAS DE PET								
Rendimiento	kg/DIA	MO.	90.0000	EQ.	90.0000		Costo unitario directo por : kg	0.82		
Código	Descripción Recurso			Unidad		Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
		Mano de Obra								
0101010005	PEON			hh		1.0000	0.0888	6.41	0.57	
								0.57		
		Materiales								
02901300190002	DETERGENTE NA PANCHA TOTAL LIMON X 225 gr.			und			0.2500	1.00	0.25	
								0.25		
PARTIDA	03.01	FILETEADO DE FIBRA DE PET								
Rendimiento	kg/DIA	MO.	60.0000	EQ.	60.0000		Costo unitario directo por : kg	1.01		
Código	Descripción Recurso			Unidad		Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
		Mano de Obra								
0101010005	PEON			hh		1.0000	0.133	6.41	0.85	
								0.85		
		Equipos								
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES			%mo			3	0.85	0.03	
0301210004	FILETEADORA DE FIBRA DE PET			hm		1.0000	0.133	1	0.13	
								Total	2.69	

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA PRESUPUESTO PRODUCCION DE FIBRA DE PET

Presupuesto	1004001	ANALISIS ECONOMICO DE PRODUCCION DE PET			
Subpresupuesto	001	PRODUCCION DE FIBRAS DE PET			
Cliente	TESIS:ESTABILIZACION DE SUELOS CON FIBRA DE PET PROBADAS EN DIFERENTES SUELOS DEL CUSCO PARA CARRETERAS			Costo al	09/06/2016
Lugar	CUSCO - CUSCO - CUSCO				
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	BOTELLAS DESCARTABLES DE PET				0.85
01.01	RECOLECCION DE LAS BOTELLAS DE PET	kg	1.00	0.99	0.82
02	LIMPIEZA DE LAS BOTELLAS DESCARTABLES DE PET				0.82
02.01	LAVADO DE BOTELLAS DE PET	kg	1.00	0.89	0.89
03	PRODUCCIÓN DE LAS FIBRAS DE PET				1.01
03.01	FILETEADO DE FIBRA DE PET	kg	1.00	1.01	1.01
	Costo Directo				2.69
SON : TRES Y 10/100 NUEVOS SOLES					

Fuente: Elaboración Propia en S10.

TABLA. COSTO UNITARIO FIBRA DE PET

MATERIAL	CANTIDAD	VALOR
FIBRA DE PET	1kg	S/. 2.69

ANÁLISIS DE PRESUPUESTO DE MEJORAMIENTO DE LA SUB RASANTE CON FIBRA SINTÉTICA.

A continuación se hace un análisis acerca de la factibilidad del uso de la fibra sintética de PET como refuerzo del suelo. Para esto se calcula el costo directo por metro cúbico, sin utilizar fibra y posteriormente con la adición de la misma y se hace una comparación en el costo y posteriormente se hace otra comparación con la estabilización de suelos con cemento y cal.

TABLA ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON MATERIAL DE CORTE, INCLUYE SUMINISTRO Y COMPACTADO.

Partida	MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON MATERIAL DE CORTE INCLUYE SUMINISTRO Y COMPACTADO							
Rendimiento	m3/DIA	MO	300		Costo unitario directo por: m3			16.93
Codigo	Descripcion Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de obra							
147000043	MAESTRO DE OBRA			hh	0.2000	0.0053	9.28	0.05
147010045	PEON			hh	5.0000	0.1333	6.41	0.85
								0.90
	Equipos							
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES			%MO		3%	0.90	0.03
348040001	CAMION CISTERNA (AGUA) 122HP 1,500 GLN			hm	1.0000	0.0267	120.00	3.20
349030007	RODILLO LISO VIBRA. AUTOP 101.135HP 10-12T			hm	1.0000	0.0267	145.00	3.87
349090000	MOTONIVELADORA DE 125 HP			hm	1.0000	0.0267	185.00	4.93
349090000	TRACTOR DE ORUGAS DE 140-160 HP			hm	1.0000	0.0267	150.00	4.00
								16.03

Fuente: Elaboración Propia.

Para este análisis se toma como ejemplo el suelo con porcentaje óptimo de fibra, que; es del 0.5% en peso. Cabe resaltar que para este proyecto dicho porcentaje se tomó del peso del suelo compactado con su humedad óptima, es decir con la densidad máxima seca del material. En consecuencia a esto y habiéndose presentado una densidad seca máxima de 2.00 g/cm³, la cantidad de fibra sintética requerida para reforzar 1 m³ de suelo es de 10, (2000 $\frac{kg}{m^3}$ 0.5% = 10 kg/m³).

$$\text{Costo fibra de PET} = 10 \frac{kg}{m^3} \times 2.69 \frac{\text{soles}}{kg} = 26.9 \text{ soles/m}^3$$

TABLA ANÁLISIS DEL COSTO POR M³ SIN FIBRA PET

ITEM		UNIDAD	CANTIDAD	PARCIAL s/.
1	PRELIMINARES			
1.1	TRAZO Y REPLANTEO	M2	1	0.16
2	EXPLANACIÓN			
2.1	EXCAVACIÓN EN MATERIAL COMÚN	M3	1	4.71
2.2	TRANSPORTE DE MATERIALES	M3	1	16.2
3	MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON MATERIAL DE CORTE	M3	1	
3.1	ESTABILIZACIÓN SUBRASANTE INCLUYE SUMINISTRO Y COMPACTADO	M3	1	16.93
	TOTAL/M3			38.00

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA ANÁLISIS DEL COSTO POR M³ CON FIBRA DE PET

ITEM		UNIDAD	CANTIDAD	PU	PARCIAL S/.
1	PRELIMINARES				
1.1	LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO	M2	1	0.16	0.16
2	EXPLANACIÓN				
2.1	EXCAVACIÓN EN MATERIAL COMÚN	M3	1	4.71	4.71
2.2	TRANSPORTE DE MATERIALES	M3	1	16.2	16.2
3	ESTABILIZACION DE LA SUB RASANTE CON 0.5% DE FIBRA DE PET	M3			
3.1	FIBRA DE PET	Kg/M3	10	2.69	26.900
3.2	ESTABILIZACION SUBRASANTE INCLUYE SUMINISTRO Y COMPACTADO	M3	1	16.93	16.93
	TOTAL/M3	Densidad	2.00 g/cm3		64.90

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar el costo del m³ de subrasante compactado sin fibra es de 38.00 mientras que la sub-base compactada con la fibra de PET es de 64.90 teniendo un incremento del 70.79 %. La factibilidad del uso de la fibra va a depender de las características requeridas de la estructura, del tiempo disponible para la realización de la obra; puesto que el empleo de la fibra de PET es muy sencillo (consiste en mezclar la fibra con el suelo) y emplea poco tiempo en comparación con otros tipos de refuerzo como la malla geo- textil cuyo colocación o distribución en el suelo requiere de más tiempo.

ANÁLISIS DEL COSTO POR M³ CON CEMENTO PORTLAND TIPO IP PARA SUBRASANTE.

TABLA. COSTO POR M³ CEMENTO PORTLAND TIPO IP.

MATERIAL	CANTIDAD	VALOR
CEMENTO PORTLAND TIPO IP	1kg	S/. 0.80

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA ANÁLISIS DEL COSTO POR M³ CON CEMENTO PORTLAND TIPO IP

ITEM		UNIDAD	CANTIDAD	PU	PARCIAL
1	PRELIMINARES				S/.
1.1	LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO	M2	1	0.16	0.16
2	EXPLANACIÓN				
2.1	EXCAVACIÓN EN MATERIAL COMÚN	M3	1	4.71	4.71
2.2	TRANSPORTE DE MATERIALES	M3	1	16.2	16.2
3	ESTABILIZACION DE LA SUB RASANTE CON 7 % DE CEMENTO PORTLAND TIPO IP	M3			
3.1	CEMENTO PORTLAND TIPO IP (42.5KG)	Kg/M3	150.5	0.80	120.4
3.3	ESTABILIZACION SUBRAZANTE INCLUYE SUMINISTRO Y COMPACTADO	M3	1	16.93	16.93
	TOTAL/M3	densidad	2.15 g/cm3		158.40

Fuente: Elaboración Propia

ANÁLISIS DEL COSTO POR M³ CON CAL PARA SUBRASANTE.

TABLA. COSTO UNITARIO DE CAL

MATERIAL	CANTIDAD	VALOR
CAL	1kg	S/. 1.20

TABLA ANÁLISIS DEL COSTO POR M³ CON 5 % DE CAL.

ITEM		UNIDAD	CANTIDAD	PU	PARCIAL
1	PRELIMINARES				S/.
1.1	LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO	M2	1	0.16	0.16
2	EXPLANACIÓN				
2.1	EXCAVACIÓN EN MATERIAL COMÚN	M3	1	4.71	4.71
2.2	TRANSPORTE DE MATERIALES	M3	1	16.2	16.2
3	ESTABILIZACION DE LA SUB RASANTE CON 5 % DE CAL	M3			
3.1	CAL HIDRATADA	Kg/M3	107.5	1.20	129.00
3.3	ESTABILIZACION SUBRAZANTE INCLUYE SUMINISTRO Y COMPACTADO	M3	1	16.93	16.93
	TOTAL/M3	densidad	2.15 g/cm3		167.00

Fuente: Elaboración Propia

OBSERVACIÓN: Comparando los análisis del costo de estabilización de subrasante para carretera por m³ con fibra de PET, Cemento Portland y Cal, se demuestra que la estabilización con fibra de PET resulta más económico en comparación con el cemento Portland.

COMPARACION PRESUPUESTO SUBRASANTE ESTABILIZADA SIN FIBRA DE PET Y CON FIBRA DE PET PARA 1 KM DE CARRETERA

El presupuesto se realizó conforme a los precios unitarios descritos líneas arriba. El presupuesto se ha calculado para una vía de 7 metros de ancho y 1000 metros longitudinales. Se ha realizado un presupuesto para la estabilización de la Subrasante.

TABLA PRESUPUESTO SUBRASANTE ESTABILIZADA SIN FIBRA DE PET (7 m de ancho de vía Y 1000 m longitudinales)

ITEM	Descripción	Espesor capa (Pulg.)	Und	Metrado	PU	Parcial s/.
1	SUB RASANTE SIN PET	16	M3	2844.8	38.00	108106.05
1.1	SUB BASE GRANULAR	19	M3	3378.2	34.18	115466.88
1.2	BASE GRANULAR	4	M3	711.2	53.13	37786.06
1.3	ESPESOR CAPA ASFALTICA	2.5	M3	444.5	183	81343.50
	TOTAL					342702.49

Fuente: Elaboración Propia

TABLA PRESUPUESTO SUBRASANTE ESTABILIZADA CON FIBRA DE PET (7 m de ancho de vía Y 1000 m longitudinales)

ITEM	Descripción	Espesor capa (Pulg.)	Und	Metrado	PU	Parcial s/.
1.1	SUB RASANTE CON PET	7.229	M3	1285.3162	64.90	83418.67
1.2	SUB BASE GRANULAR	9	M3	1600.2	34.18	54694.84
1.3	BASE GRANULAR	4	M3	711.2	53.13	37786.06
1.4	ESPESOR CAPA ASFALTICA	2.5	M3	444.5	183	81343.50
	TOTAL					257243.06

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar el costo por 7 metros de ancho y 1000 m longitudinales y con espesor de capa de 16 pulg. Compactado sin fibra es de 342702.49 soles mientras que la Subrasante compactada con la fibra es de 257243.06 teniendo un incremento del 24.94%. El empleo de la fibra de PET es económico.

TABLA PRESUPUESTO SUBRASANTE ESTABILIZADA CON CEMENTO (7 m de ancho de vía Y 1000 m longitudinales)

COSTO DE ESTABILIZACION DE SUELO CON CEMENTO PARA UNA CARRETERA DE 1Km Y ANCHO DE VIA DE 7m.						
ITEM	Descripción	Espesor capa (Pulg.)	Und	Metrado	PU	Parcial s/.
1.1	SUB RASANTE CON CEMENTO	6	M3	1066.8	158.40	168982.49
1.2	SUB BASE GRANULAR	7	M3	1244.6	34.18	42540.43
1.3	BASE GRANULAR	3.5	M3	622.3	53.13	33062.80
1.4	ESPESOR CAPA ASFALTICA	2.5	M3	444.5	183	81343.50
	TOTAL					325929.22

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA PRESUPUESTO SUBRASANTE ESTABILIZADA CON CAL (7 m de ancho de vía Y 1000 m longitudinales)

COSTO DE ESTABILIZACION DE SUELO CON CAL PARA UNA CARRETERA DE 1Km Y ANCHO DE VIA DE 7m.						
ITEM	Descripción	Espesor capa (Pulg.)	Und	Metrado	PU	Parcial s/.
1.1	SUB RASANTE CON CAL	7	M3	1244.6	167.00	207849.80
1.2	SUB BASE GRANULAR	8	M3	1422.4	34.18	48617.63
1.3	BASE GRANULAR	3.5	M3	622.3	53.13	33062.80
1.4	ESPESOR CAPA ASFALTICA	2.5	M3	444.5	183	81343.50
	TOTAL					370873.73

Fuente: Elaboración Propia

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COSTO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO NATURAL, CON PET (0.05%), CEMENTO (7%) Y CON CAL (5%) PARA SUBRASANTE DE CARRETERA.

Tabla. Comparación de costo de estabilización de suelo natural, con PET (0.05%), cemento (7%) y con cal (5%) para una carretera de 1km y ancho de vía de 7m.

	ESTABILIZACIÓN DE SUELO SIN PET	ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON PET	ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON CAL	ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON CEMENTO
% DE DOSIFICACIÓN DE ADITIVO	-	0.5%	5 %	7 %
CBR CALCULADO	6.6 %	17.7%	26%	30%
MODULO RESILIENTE	8548.7 psi	16073 psi	20304 psi	22529 psi
	ESPESOR CAPA ASFALTICA 2.5 Pulgadas			
	BASE GRANULAR 4 Pulgadas	ESPESOR CAPA ASFALTICA 2.5 Pulgadas		
		BASE GRANULAR 4 Pulgadas	ESPESOR CAPA ASFALTICA 2.5 Pulgadas	
	SUB BASE GRANULAR 19 Pulgadas		BASE GRANULAR 3.5 Pulgadas	ESPESOR CAPA ASFALTICA 2.5 Pulgadas
			SUB BASE GRANULAR 9 Pulgadas	BASE GRANULAR 3.5 Pulgadas
			SUB BASE GRANULAR 8 Pulgadas	SUB BASE GRANULAR 7 Pulgadas
				SUBRASANTE 6 Pulgadas
	SUBRASANTE 16 Pulgadas	SUBRASANTE 7.23 Pulgadas	SUBRASANTE 7 Pulgadas	
COSTO DE ESTABILIZACIÓN S/.	X S/. 342702.49	A S/. 257243.06	B S/. 370873.73	C S/. 325929.22
Porcentaje de Costos con respecto a la estabilización de suelo sin aditivo (X/X) %	X/X 100.00 %	A/X 75.06 %	B/X 108.22 %	C/X 95.11 %
Diferencia de costos de las estabilizaciones con respecto a la estabilización de suelo sin aditivo. 100% - (X/X) %	-	24.94 %	-8.22 %	4.89 %

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla. Estabilización de los principales tipos de suelos (Fernández L. C. 1982). Tomado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 201, Sanfandila, Qro. 2002.

Componente dominante	Estabilizante recomendado	Objetivos
Arenas	Arcilla de baja plasticidad	Para estabilización mecánica
Limos	Cemento Pórtland	Incrementar el peso volumétrico y la cohesión
	Dependerá del tipo de minerales que contenga.	
Alófanos	Cal	Acción puzolánica e incremento en el peso volumétrico
Caolín	Arena	Para estabilización mecánica
	Cemento	Para resistencias tempranas
	Cal	Trabajabilidad y resistencia tardía
Illita	Cemento	Igual que el caolín
	Cal	Igual que el caolín
Montmorilonita	Cal	Trabajabilidad y resistencia reducción de expansiones y contracciones

SUELO – PET: Disminuye el índice de plasticidad de suelos plásticos. Aumenta el IP de los suelos no plásticos. Suelos Arcillo limosos, Suelos Grava arenosos Suelos Arcillo arenosos, Suelos Arena uniforme brinda resistencia a la compresión con 0.05% de contenido de fibra de PET.

SUELO – CEMENTO: Para suelos arcillosos resulta más complicado. Complicaciones al mezclar cementos con arcillas suaves y húmedas (LL>50%, IP>18). Requiere pre tratamiento con cal. Aumenta la resistencia a la compresión del suelo hasta contenidos de cemento de más del 10%. Suelos Arcillo limosos brinda resistencia a la compresión de 30 kg/cm² con 5% de contenido de cemento. Suelos Grava arenosos brinda resistencia a la compresión de 58 kg/cm² con 5% de contenido de cemento. Suelos Arcillo arenosos brinda resistencia a la compresión de 24 kg/cm² con 5% de contenido de cemento. Suelos Arena uniforme brinda resistencia a la compresión de 8 kg/cm² con 5% de cemento.

SUELO – CAL: Disminuye el índice de plasticidad de suelos plásticos. Suelos Arcillo limosos brinda resistencia a la compresión de 18 kg/cm² con 5% de contenido de cal. Suelos Grava arenosos brinda resistencia a la compresión de 8 kg/cm² con 5% de contenido de cal. Suelos Arcillo arenosos brinda resistencia a la compresión de 5 kg/cm² con 5% de contenido de cal. Suelos Arena uniforme brinda resistencia a la compresión de 2 kg/cm² con 5% de contenido de cal.

ANEXO Nº 3

PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA FIBRA DE PET

Se obtiene manualmente mediante el trazado con las medidas adecuadas con lápiz y el cortado se realiza con la tijera.

PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA FIBRA DE PET MANUALMENTE.

1.- El material utilizado son las botellas de PET.

Figura: Botellas descartables de PET de diferentes gaseosas o bebidas de agua.



Fuente: propia.

2.- Primero se cortó la base que no vale porque no tiene una superficie plana.

Figura: Preparación de las estiras de PET para la obtención de fibras.



Fuente: propia.

3.- Luego se cortó estiras planas de PET de 5 cm.

Figura: Fibras de PET cortadas a las medidas requeridas con la tijera.



Fuente: propia.

4.- Luego es cortada las fibras de PET a partir de las estiras planas por medio de una tijera. Las fibras tienen 5 cm de largo y se cortaron con un ancho de 0.25 mm, 0.4 mm, 1 mm y 1.3 mm. Deben ser cortados por separados con los distintos anchos cada uno en suficiente cantidad.

Figura: Fibras de PET cortadas con tijera.



Fuente: propia.

5.- Para la obtención de la cantidad necesaria de PET se contó con el apoyo de un personal.

Figura: Fibras de PET cortadas con personal.



Fuente: propia.

PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA FIBRA DE PET CON MAQUINA FILETEADORA

Figura: Maquina Fileteadora de fibra de PET



Fuente: propia.

Figura: Colocado inicial de fibra de PET para el cortado con la Maquina Fileteadora



Fuente: propia.

Figura: Operación de la Maquina Fileteadora para la obtención de la fibra de PET.



Fuente: propia.

ANEXO Nº 4

GALERIA DE FOTOS

Foto: Cantera Pata Pata – San Jerónimo - Cusco



Fuente: propia.

Foto: Ocollo Pampa – San Jerónimo - Cusco



Fuente: propia.

Foto: Cantera de Huancaro – Santiago - cusco



Fuente: propia.

Foto: Tamizado del material con la malla $\frac{3}{4}$ ”



Fuente: propia.

Foto: Inspección de los Tamices para el análisis granulométrico por el Ing. Geólogo.



Fuente: propia.

Foto: Tamizado del suelo en seco y en húmedo.



Fuente: propia.

Foto: Pruebas de límites líquido y límite plástico.



Fuente: propia.

Foto: Preparacion del material para las pruebas Proctor Modificaco y CBR.



Fuente: propia.

Foto: Mezclado del material con agua para las pruebas Próctor Modificado y CBR.



Fuente: propia.

Foto: a) Pesado para el calculo de humedad de los suelos en las pruebas proctor modificado y CBR. b) Secado de los suelos húmedos en el Horno.



a)

b)

Fuente: propia.

Foto: Mezclado del suelo con las fibras de PET



Fuente: propia.

Foto: Compactación de las capas de suelo con PET



Fuente: propia.

Foto: Lectura de expansión del suelo despues de 4 días de reposo en agua.



Fuente: propia.

Foto: Aplicación de carga a las muestras para determinar su valor CBR.



Fuente: Propia.

Foto: Suelo reforzado con fibra de PET compactado.



Fuente: Propia.

ANEXO Nº 5

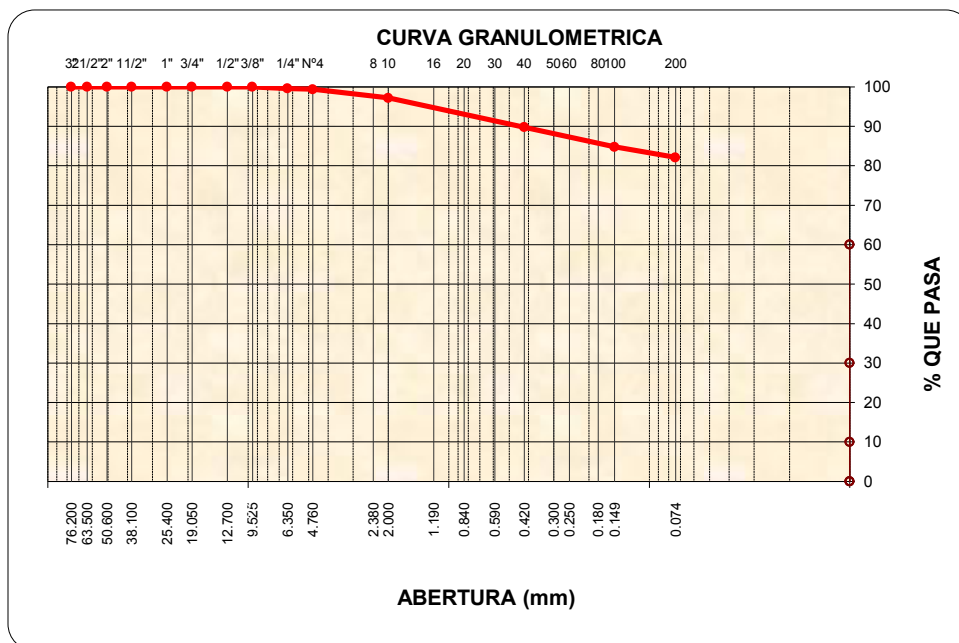
PRUEBAS DE ANALISIS GRANULOMETRICO.

SUELO SIN ADITIVO: SECTOR: SAN MIGUEL - SAN SEBASTIÁN - CUSCO

Granulometría (NTP 339,127)					
Datos de ensayo			Datos de Clasificación		
Peso Total	:	935.3	Grava	:	13,2%
Peso de muestra lavada:		168.7	Arena	:	36,4%
Perdida por lavada:		766.6	Finos	:	50,4%

Malla		Peso (gr)	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% que Pasa	Especificaciones
Tamiz	mm.					
3"	76.200				100.00	
2 1/2"	63.500	0.0	0.00	0.0	100.00	
2"	50.600	0.0	0.00	0.0	100.00	
1 1/2"	38.100	0.0	0.00	0.0	100.00	
1"	25.400	0.0	0.00	0.0	100.00	
3/4"	19.050	0.0	0.00	0.0	100.00	
1/2"	12.700	0.0	0.00	0.0	100.00	
3/8"	9.525	0.0	0.00	0.0	100.00	
1/4"	6.350	3.6	0.40	0.4	99.60	
No4	4.760	2.1	0.20	0.6	99.40	
10	2.000	20.7	2.20	2.8	97.20	
40	0.420	69.3	7.40	10.2	89.80	
100	0.149	47.1	5.00	15.2	84.80	
200	0.074	25.0	2.70	17.9	82.10	
< 200		1.0	0.10	18.0	82.00	
deja x lavado		766.6	82.00	100.0	0.00	
Total		935.4	100.00			

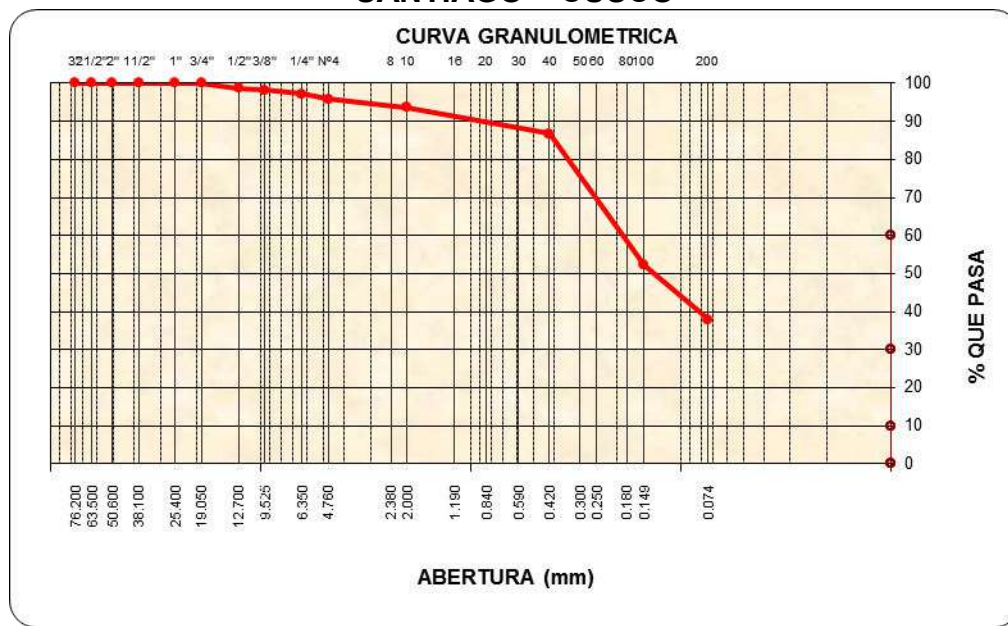
CURVA DE ANALISIS GRANULOMETRICO SECTOR: SAN MIGUEL - SAN SEBASTIÁN - CUSCO



SUELO SIN ADITIVO: SECTOR: HUANCARO - SANTIAGO – CUSCO

Granulometría (NTP 339,127)						
Datos de ensayo			Datos de Clasificación			
Peso Total	:	1023.8	Grava	:	13,2%	
Peso de muestra lavada:		655.9	Arena	:	36,4%	
Perdida por lavada:		367.9	Finos	:	50,4%	
Malla	Peso	% Ret	% Ret	% que	Especifi-	
Tamiz	mm.	(gr)	Parcial	Acum.	Pasa	caciones
3"	76.20				100.00	
2 1/2"	63.50	0.0	0.00	0.0	100.00	
2"	50.60	0.0	0.00	0.0	100.00	
1 1/2"	38.10	0.0	0.00	0.0	100.00	
1"	25.40	0.0	0.00	0.0	100.00	
3/4"	19.050	0.0	0.00	0.0	100.00	
1/2"	12.700	13.7	1.30	1.3	98.70	
3/8"	9.525	3.9	0.40	1.7	98.30	
1/4"	6.350	10.8	1.10	2.8	97.20	
No4	4.760	12.9	1.30	4.1	95.90	
10	2.000	22.7	2.20	6.3	93.70	
40	0.420	71.4	7.00	13.3	86.70	
100	0.149	351.9	34.40	47.7	52.30	
200	0.074	146.8	14.30	62.0	38.00	
< 200		21.5	2.10	64.1	35.90	
dejax labado		367.9	35.90	100.0	0.00	
Total		1023.5	100.00			

CURVA DE ANALISIS GRANULOMETRICO SECTOR: HUANCARO - SANTIAGO – CUSCO

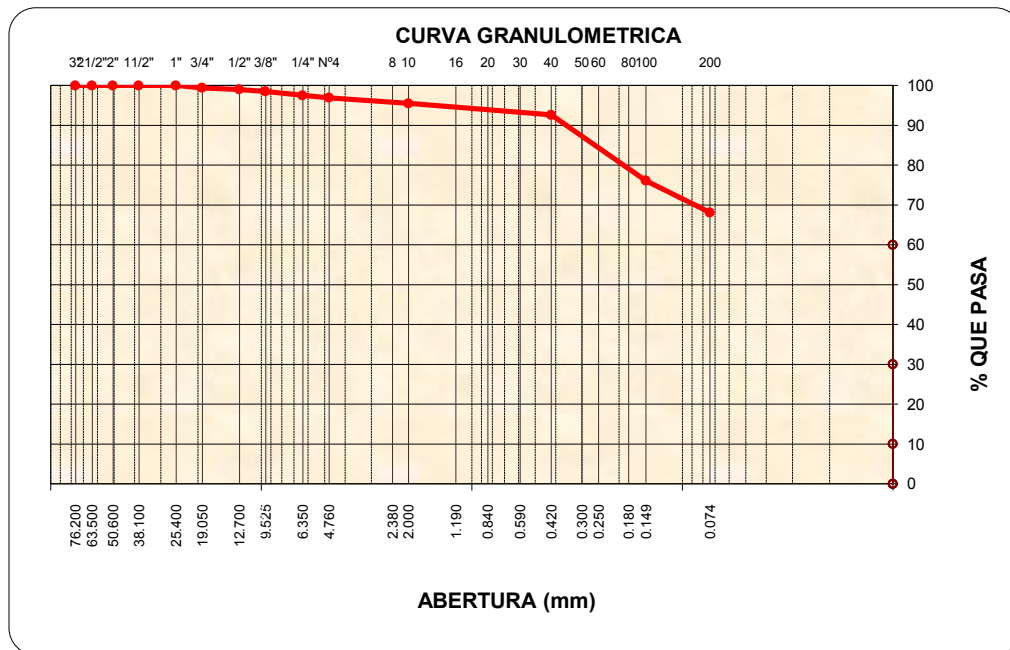


SUELO SIN ADITIVO SECTOR: OSCOLLOPAMPA - SAN JERONIMO - CUSCO

<u>Granulometría (NTP 339,127)</u>					
Datos de ensayo			Datos de Clasificación		
Peso Total	:	1272.9	Grava	3.11	%
Peso de muestra lavada:		412.0	Arena	28.78	%
Perdida por lavada:		860.9	Finos	0.46	%

Malla		Peso (gr)	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% que Pasa	Especificaciones
Tamiz	mm.					
3"	76.200				100.00	
2 1/2"	63.500	0.0	0.00	0.0	100.00	
2"	50.600	0.0	0.00	0.0	100.00	
1 1/2"	38.100	0.0	0.00	0.0	100.00	
1"	25.400	0.0	0.00	0.0	100.00	
3/4"	19.050	8.2	0.60	0.6	99.40	
1/2"	12.700	4.7	0.40	1.0	99.00	
3/8"	9.525	6.9	0.50	1.5	98.50	
1/4"	6.350	12.2	1.00	2.5	97.50	
No4	4.760	7.6	0.60	3.1	96.90	
10	2.000	17.7	1.40	4.5	95.50	
40	0.420	36.8	2.90	7.4	92.60	
100	0.149	209.9	16.50	23.9	76.10	
200	0.074	101.9	8.00	31.9	68.10	
< 200		5.9	0.50	32.4	67.60	
deja x labado		860.9	67.60	100.0	0.00	
Total		1272.7	100.00			

CURVA DE ANALISIS GRANULOMETRICO SECTOR: OSCOLLOPAMPA - SAN JERONIMO - CUSCO

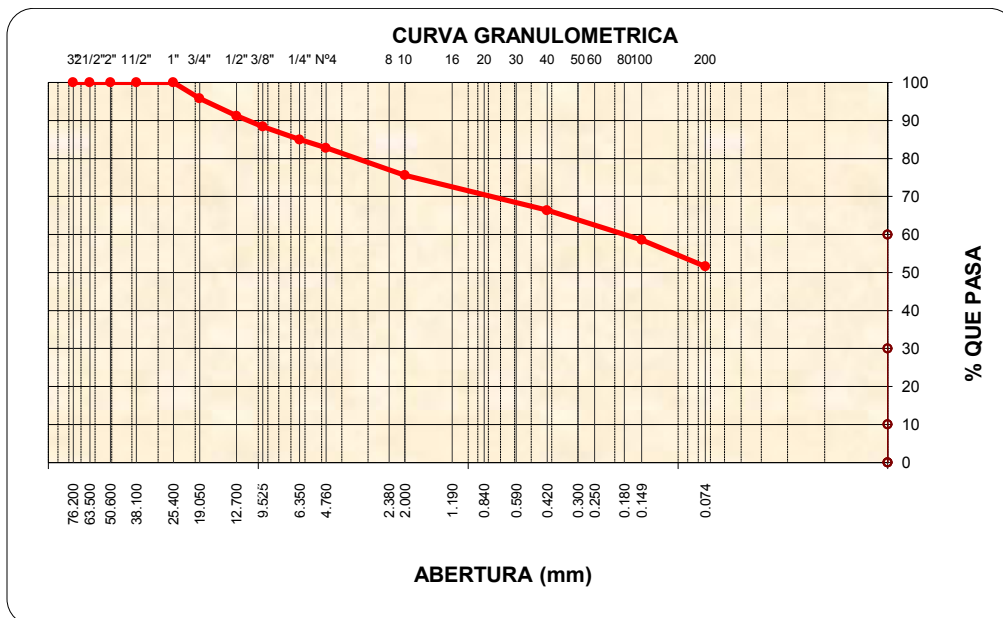


SUELO SIN ADITIVO SECTOR: PATA PATA - SAN JERONIMO - CUSCO

Granulometría (NTP 339,127)					
Datos de ensayo			Datos de Clasificación		
Peso Total	:	1229.2	Grava	:	13,2%
Peso de muestra lavada:		606.7	Arena	:	36,4%
Perdida por lavada:		622.5	Finos	:	50,4%



Malla	Peso	% Ret	% Ret	% que	Especificaciones
Tamiz mm.	(gr)	Parcial	Acum.	Pasa	
3"	76.20			100.00	
2 1/2"	63.50	0.0	0.00	100.00	
2"	50.60	0.0	0.00	100.00	
1 1/2"	38.10	0.0	0.00	100.00	
1"	25.40	0.0	0.00	100.00	
3/4"	19.050	51.3	4.20	95.80	
1/2"	12.700	56.2	8.8	91.20	
3/8"	9.525	35.0	2.80	88.40	
1/4"	6.350	41.3	3.40	85.00	
No4	4.760	27.0	2.20	82.80	
10	2.000	88.5	7.20	75.60	
40	0.420	113.5	9.20	66.40	
100	0.149	95.7	7.80	58.60	
200	0.074	86.6	7.00	51.60	
< 200		11.0	0.90	49.3	
leja x lavado		622.5	50.70	100.0	0.00
Total		1228.6	100.00		

CURVA DE ANALISIS GRANULOMETRICO SECTOR: PATA PATA - SAN JERONIMO - CUSCO



ANEXO N° 6

PRUEBAS DE CBR DE LOS SUELOS NATURALES SIN FIBRA DE PET

	UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA "ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL"											
TESIS: ESTABILIZACION DE SUELOS CON TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, Y PUEDA SER UTILIZADO EN LAS CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS												
ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145												
DATOS DE LA MUESTRA												
REALIZADO POR: : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA												
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS												
UBICACIÓN : San Miguel - San Sebastian- Cusco		DISTRITO : MURL										
ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS (CBR) MTC E 132 - 2000												
DATOS DEL MOLDE (cm.)	MOLDE N° M	MOLDE N° 16	MOLDE N° K	DATOS GENERALES								
	56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES									
Altura	11.70	11.70	11.70	xx. Densidad Seca (Kg/m ³) : 2.00								
Diámetro	15.30	15.29	15.29	Humedad Optima : 16.4%								
Volumen	2151.1	2148.3	2148.3									
C DATOS DE COMPACTACION	56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES									
O Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,022	8,924	8,477	Peso del martillo : 10 lbs								
M Peso del Molde (gr)	4000	4035	3993	Altura del martillo : 18 pulg								
P Peso de la Muestra Compacta (gr)	5,022	4,889	4,484	Número de Capas : 5 capas								
A Densidad Humeda (gr/cm ³)	2.33	2.28	2.09	Número de golpes : 56 capa								
C Densidad Seca (gr/cm ³)	2.002	1.95	1.78									
H Peso del Tarro (gr)	40.47	39.60	40.86	41.31	39.83	41.05	Clasificación Suelo					
U Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)	112.50	121.00	126.20	136.80	124.40	123.54						
M Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)	102.28	109.33	114.35	122.99	112.16	111.58						
E Peso del Agua (gr)	10.22	11.67	11.85	13.81	12.24	11.96	SUCS: OL - CL					
D Peso del Suelo Seco (gr)	61.81	69.73	73.49	81.68	72.33	70.53	AASTHO: A-6 (18)					
A Contenido de Humedad	16.53%	16.74%	16.12%	16.91%	16.92%	16.96%						
D Contenido de Humedad Promedio	16.64%		16.52%		16.94%							
A Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)	9,060		9,028		8,648							
B Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,022		8,924		8,477							
S Porcentaje de Absorción	0.76%		2.13%		3.81%							
E CTE. DIAL EXPANSION	0.001	MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K				
X	FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.
P	18/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%
A	19/03/2016	10.00	24 horas	8	0.008	0.17%	33	0.033	0.72%	48	0.048	1.04%
N	20/03/2016	10.00	48 horas	8	0.008	0.17%	33	0.033	0.72%	48	0.048	1.04%
S	21/03/2016	10.00	72 horas	8	0.008	0.17%	33	0.033	0.72%	48	0.048	1.04%
I	22/03/2016	10.00	96 horas	8	0.008	0.17%	33	0.033	0.72%	48	0.048	1.04%
				MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K		
P	AREA PISTON	3.0	Pulg. Cuadr.	56 GOLPES			25 GOLPES			12 GOLPES		
E	TIEMPO	PENETRACION		Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.
N		(mm)	(pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI
E	0.5 min	0.64	0.025	7	66	22	6	57	19	3	28	9
T	1.0 min	1.27	0.050	11	104	35	10	95	32	5	47	16
R	1.5 min	1.91	0.075	16	152	51	15	142	47	7	66	22
A	2.0 min	2.54	0.100	21	199	66	19	180	60	8	76	25
C	4.0 min	5.08	0.200	42	399	133	38	361	120	16	152	51
I	6.0 min	7.62	0.300	63	599	200	57	542	181	24	228	76
O	8.0 min	10.16	0.400	84	798	266	76	722	241	32	304	101
N	10.0 min	12.70	0.500	105	998	333	95	903	301	40	380	127

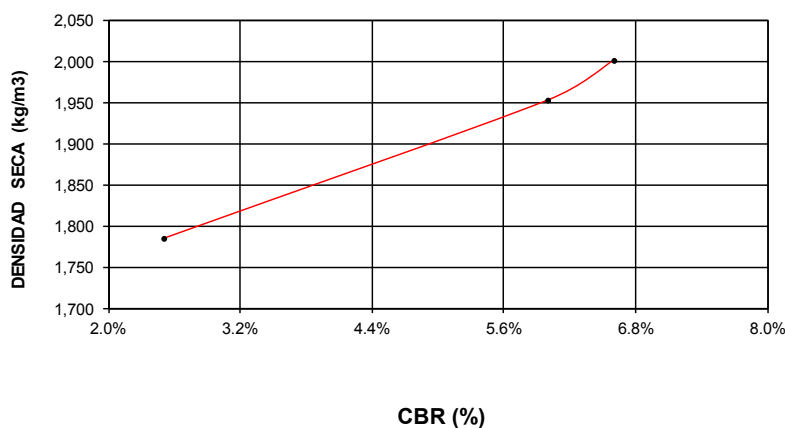
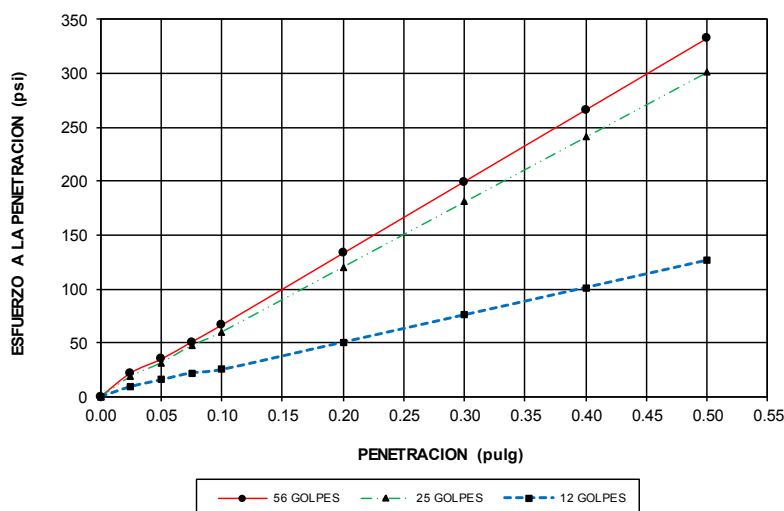


LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

GRAFICOS ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
 NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : San Miguel - San Sebastian - Cusco **DOSIHACION** NATURAL



RESULTADOS

MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.002	CBR AL 95% DE MDS =	4.8%
HUMEDAD OPTIMA (%)	:16.4%	CBR AL 100% DE MDS =	6.6%

Nº GOLFES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.74
56 GOLFES	0.17%	0.76%	
25 GOLFES	0.72%	2.13%	
12 GOLFES	1.04%	3.81%	



TESIS: ESTABILIZACION DE SUELOS CON TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, Y PUEDA SER UTILIZADO EN LAS CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Huancaro- Santiago- Cusco

DOSIERACION

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS (CBR) MTC E 132 - 2000

DATOS DEL MOLDE (cm.)		MOLDE N° M	MOLDE N° 16	MOLDE N° K	DATOS GENERALES							
		56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES								
Altura		11.70	11.70	11.70	Max. Densidad Seca	2.00						
Diámetro		15.29	15.28	15.28	Humedad Optima	12.10%						
Volumen		2148.3	2145.5	2145.5	Humedad Natural							
C DATOS DE COMPACTACION		56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES								
O	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,234	8,884	8,689	Peso del martillo	10 lbs						
M	Peso del Molde (gr)	4372	4102	4086	Altura del martillo	18 pulg						
P	Peso de la Muestra Compacta (gr)	4,862	4,782	4,603	Número de Capas	5 capas						
A	Densidad Humeda (gr/cm3)	2.26	2.23	2.15	Número de golpes	56 capa						
C	Densidad Seca (gr/cm3)	2.00	1.97	1.90								
H	Peso del Tarro (gr)	39.96	38.07	40.49	41.97	40.14	39.60					
U	Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)	139.31	148.98	145.28	146.28	131.75	149.18					
M	Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)	127.90	136.24	132.64	134.50	121.50	136.83					
E	Peso del Agua (gr)	11.41	12.74	12.64	11.78	10.25	12.35					
D	Peso del Suelo Seco (gr)	87.94	98.17	92.15	92.53	81.36	97.23					
A	Contenido de Humedad	12.97%	12.98%	13.72%	12.73%	12.60%	12.70%					
D	Contenido de Humedad Promedio	12.98%		13.22%		12.65%						
A	Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)	9,315		9,009		8,831						
B	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,234		8,884		8,689						
S	Porcentaje de Absorción	1.67%		2.61%		3.08%						
E	CTE. DIAL EXPANSION	0.001	MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K			
X	FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.
P	18/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%
A	19/03/2016	10.00	24 horas	2	0.002	0.04%	3	0.003	0.07%	16	0.016	0.35%
N	20/03/2016	10.00	48 horas	2	0.002	0.04%	3	0.003	0.07%	16	0.016	0.35%
S	21/03/2016	10.00	72 horas	2	0.002	0.04%	3	0.003	0.07%	16	0.016	0.35%
I	22/03/2016	10.00	96 horas	2	0.002	0.04%	3	0.003	0.07%	16	0.016	0.35%
CTE. ANILLO=		MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K				
P				56 GOLPES			25 GOLPES			12 GOLPES		
E	TIEMPO	PENETRACION		Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.
N		(mm)	(pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI
E	0.5 min	0.64	0.025	20	190	63	18	171	57	12	114	38
T	1.0 min	1.27	0.050	31	295	98	28	266	89	26	247	82
R	1.5 min	1.91	0.075	43	409	136	36	342	114	28	266	89
A	2.0 min	2.54	0.100	70	665	222	65	618	206	45	428	143
C	4.0 min	5.08	0.200	140	1330	443	130	1235	412	90	855	285
I	6.0 min	7.62	0.300	210	1993	664	195	1851	617	135	1283	428
O	8.0 min	10.16	0.400	280	2654	885	260	2466	822	180	1709	570
N	10.0 min	12.70	0.500	350	3315	1105	325	3079	1026	225	2135	712

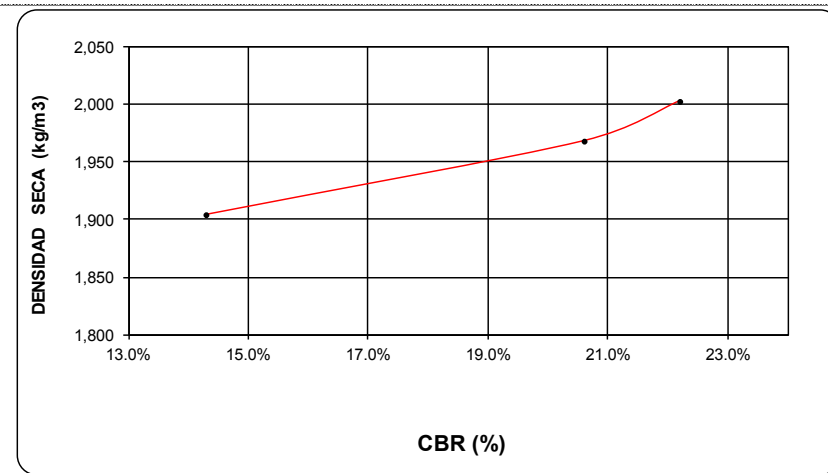
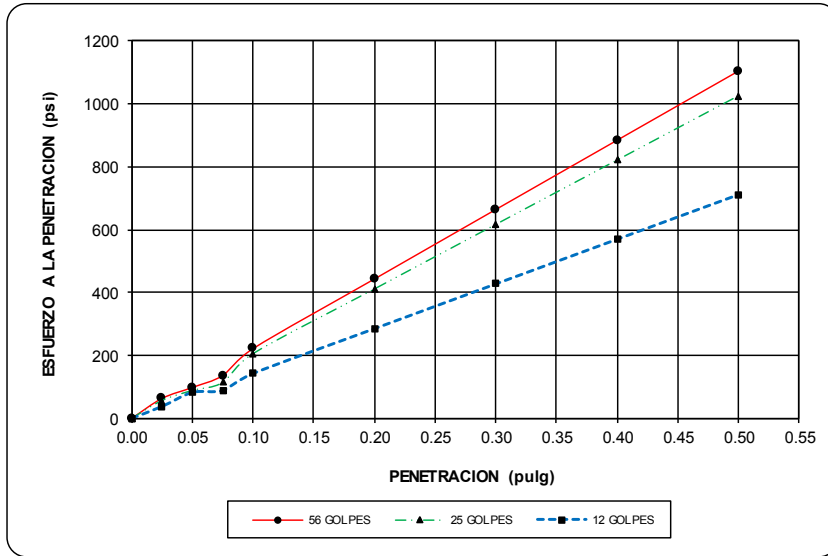


LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

GRAFICOS ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
 NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Huancaro- Santiago- Cusco **DISEÑO** 0



RESULTADOS

MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.00	CBR AL 95% DE MDS =	18.1%
HUMEDAD OPTIMA (%)	12.10%	CBR AL 100% DE MDS =	22.2%

Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.75
56 GOLPES	0.04%	1.67%	
25 GOLPES	0.07%	2.61%	
12 GOLPES	0.35%	3.08%	



UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
"ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL"



TESIS: ESTABILIZACION DE SUELOS CON TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, Y PUEDA SER UTILIZADO EN LAS CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA

PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS

UBICACIÓN : Ocollo Pampa - San Jeronimo - Cusco

DSHHCACON

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS (CBR) MTC E 132 - 2000

DATOS DEL MOLDE (cm.)	MOLDE N° M	MOLDE N° 16	MOLDE N° K	DATOS GENERALES								
	56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES									
Altura	11.70	11.70	11.70	Max. Densidad Seca	2.11							
Diámetro	15.30	15.27	15.28	Humedad Optima	12.16%							
Volumen	2151.1	2142.7	2145.5	Humedad Natural								
C DATOS DE COMPACTACION	56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES									
O Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,300	9,172	9,001	Peso del martillo	10 lbs							
M Peso del Molde (gr)	4194	4186	4180	Altura del martillo	18 pulg							
P Peso de la Muestra Compacta (gr)	5,106	4,986	4,821	Número de Capas	5 capas							
A Densidad Humeda (gr/cm3)	2.37	2.33	2.25	Número de golpes	56 capa							
C Densidad Seca (gr/cm3)	2.11	2.07	1.99									
H Peso del Tarro (gr)	39.61	41.27	41.33	41.59	41.97	41.36						
U Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)	144.07	150.10	155.42	134.17	146.86	155.46						
M Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)	132.25	138.16	142.58	124.01	135.61	141.17						
E Peso del Agua (gr)	11.82	11.94	12.84	10.16	11.25	14.29						
D Peso del Suelo Seco (gr)	92.64	96.89	101.25	82.42	93.64	99.81						
A Contenido de Humedad	12.76%	12.32%	12.68%	12.33%	12.01%	14.32%						
D Contenido de Humedad Promedio	12.54%		12.50%		13.17%							
A Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)	9,377		9,282		9,200							
B Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,300		9,172		9,001							
S Porcentaje de Absorción	1.51%		2.21%		4.13%							
E CTE. DIAL EXPANSION	0.001	MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K				
X	FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.
P	18/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%
A	19/03/2016	10.00	24 horas	23	0.023	0.50%	46	0.046	1.00%	57	0.057	1.24%
N	20/03/2016	10.00	48 horas	24	0.024	0.52%	48	0.048	1.04%	58	0.058	1.26%
S	21/03/2016	10.00	72 horas	24	0.024	0.52%	48	0.048	1.04%	58	0.058	1.26%
I	22/03/2016	10.00	96 horas	24	0.024	0.52%	48	0.048	1.04%	58	0.058	1.26%
CTE. ANILLO=				MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K		
P				56 GOLPES			25 GOLPES			12 GOLPES		
E	TIEMPO	PENETRACION		Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.
N		(mm)	(pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI
E	0.5 min	0.64	0.025	10	95	32	8	76	25	2	19	6
T	1.0 min	1.27	0.050	19	180	60	16	152	51	5	47	16
R	1.5 min	1.91	0.075	30	285	95	23	219	73	6	57	19
A	2.0 min	2.54	0.100	40	380	127	31	295	98	8	76	25
C	4.0 min	5.08	0.200	80	760	253	62	589	196	16	152	51
I	6.0 min	7.62	0.300	120	1140	380	93	884	295	24	228	76
O	8.0 min	10.16	0.400	160	1519	506	124	1178	393	32	304	101
N	10.0 min	12.70	0.500	200	1898	633	155	1472	491	40	380	127

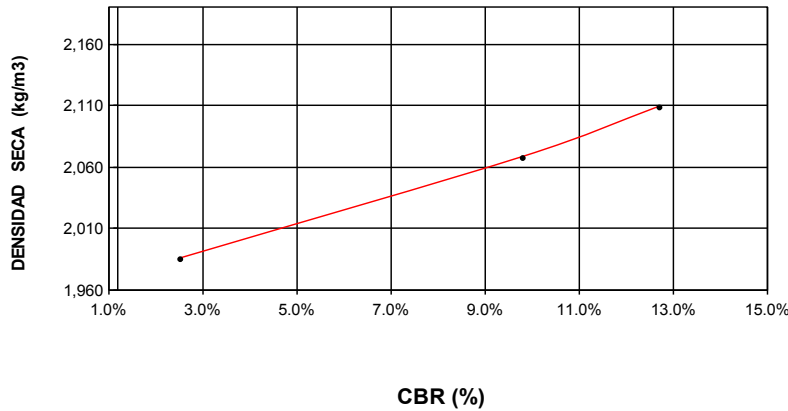
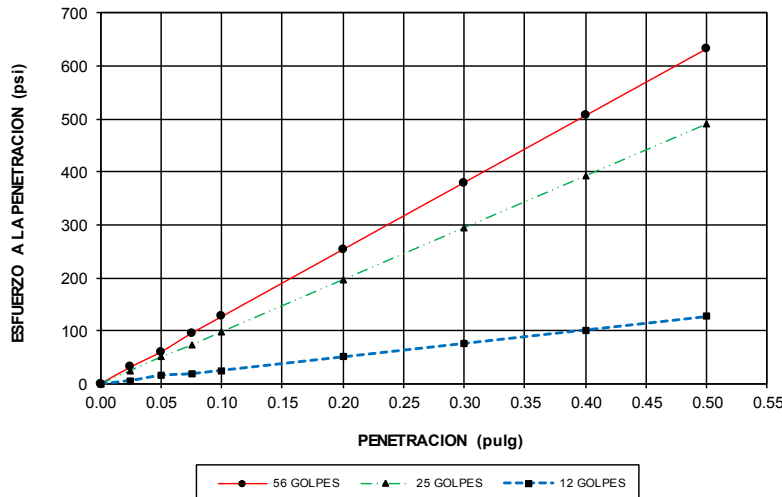


LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

GRAFICOS ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
 NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Oscollo Pampa - San Jeronimo - Cusco **DOSIFICACION** 0



RESULTADOS

MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.109	CBR AL 95% DE MDS =	7.9%
HUMEDAD OPTIMA (%)	12.16%	CBR AL 100% DE MDS =	12.7%

Nº GOLFES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.75
56 GOLFES	0.52%	1.51%	
25 GOLFES	1.04%	2.21%	
12 GOLFES	1.26%	4.13%	



TESIS: ESTABILIZACION DE SUELOS CON TEREFTALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, Y PUEDA SER UTILIZADO EN LAS CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: : Br. FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Pata pata- San Jeronimo - Cusco **DOSIFICACION** natural

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS (CBR) MTC E 132 - 2000

DATOS DEL MOLDE (cm.)		MOLDE N° M		MOLDE N° 16		MOLDE N° K		DATOS GENERALES						
		56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES								
Altura		11.70		11.70		11.70		Max. Densidad Seca	2.26					
Diámetro		15.28		15.28		15.27		Humedad Optima	9.40%					
Volumen		2145.5		2145.5		2142.7		Humedad Natural						
C DATOS DE COMPACTACION		56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES								
O	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,354		9,456		9,120		Peso del martillo	10 lbs					
M	Peso del Molde (gr)	4029		4186		4149		Altura del martillo	18 pulg					
P	Peso de la Muestra Compacta (gr)	5,325		5,270		4,971		Número de Capas	5 capas					
A	Densidad Humeda (gr/cm3)	2.48		2.46		2.32		Número de golpes	56 capa					
C	Densidad Seca (gr/cm3)	2.26		2.23		2.09								
H	Peso del Tarro (gr)	37.78	40.07	40.60	41.28	40.50	34.70	Clasificación						
U	Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)	134.22	144.56	137.23	144.03	140.10	138.92	Suelo						
M	Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)	126.00	135.15	128.03	134.55	130.36	128.65							
E	Peso del Agua (gr)	8.22	9.41	9.20	9.48	9.74	10.27	SUCS	ML					
D	Peso del Suelo Seco (gr)	88.22	95.08	87.43	93.27	89.86	93.95	AASTHO	A-4 (3)					
A	Contenido de Humedad	9.32%	9.90%	10.52%	10.16%	10.84%	10.93%							
D	Contenido de Humedad Promedio	9.61%		10.34%		10.89%								
A	Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)	9,410		9,549		9,283								
B	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,354		9,456		9,120								
S	Porcentaje de Absorción	1.05%		1.76%		3.28%								
E	CTE. DIAL EXPANSION		0.001			MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K		
X	FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.		
P	18/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%		
A	19/03/2016	10.00	24 horas	2.2	0.002	0.05%	0	0.000	0.00%	4	0.004	0.09%		
N	20/03/2016	10.00	48 horas	2.2	0.002	0.05%	3	0.003	0.07%	4	0.004	0.09%		
S	21/03/2016	10.00	72 horas	2.2	0.002	0.05%	3	0.003	0.07%	4	0.004	0.09%		
I	22/03/2016	10.00	96 horas	2.2	0.002	0.05%	3	0.003	0.07%	4	0.004	0.09%		
CTE. ANILLO=					MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K			
P				56 GOLPES			25 GOLPES			12 GOLPES				
E	TIEMPO	PENETRACION		Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.		
N		(mm)	(pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI		
E	0.5 min	0.64	0.025	16	152	51	15	142	47	13	123	41		
T	1.0 min	1.27	0.050	33	314	105	29	276	92	20	190	63		
R	1.5 min	1.91	0.075	56	532	177	52	494	165	26	247	82		
A	2.0 min	2.54	0.100	75	713	238	69	656	219	31	295	98		
C	4.0 min	5.08	0.200	150	1425	475	139	1320	440	62	589	196		
I	6.0 min	7.62	0.300	225	2135	712	208	1974	658	93	884	295		
O	8.0 min	10.16	0.400	300	2843	948	277	2626	875	124	1178	393		
N	10.0 min	12.70	0.500	375	3550	1183	346	3277	1092	155	1472	491		



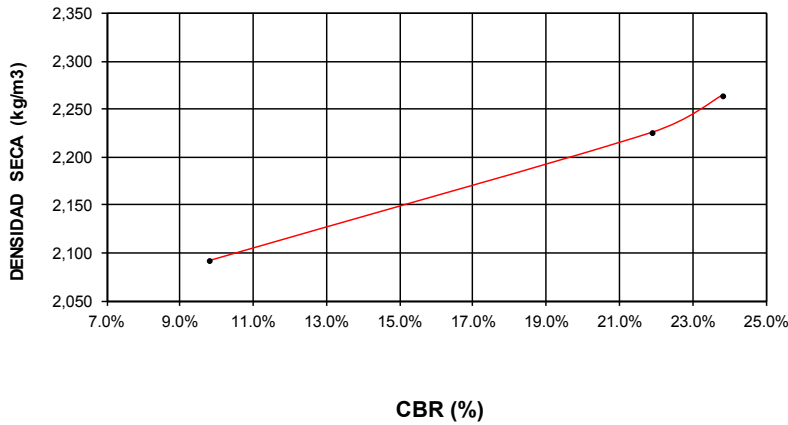
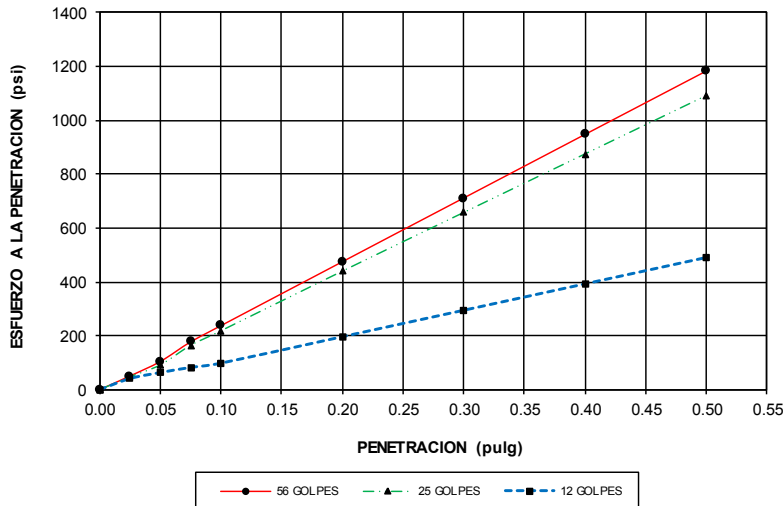
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

GRAFICOS ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
 NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Pata pata- San Jeronimo - Cusco

DOSHACION natural



RESULTADOS



MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m ³)	2.264	CBR AL 95% DE MDS =	17.6%
HUMEDAD OPTIMA (%)	9.40%	CBR AL 100% DE MDS =	23.8%

Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.75
56 GOLPES	0.05%	1.05%	
25 GOLPES	0.07%	1.76%	

12 GOLPES	0.09%	3.28%
-----------	-------	-------

ANEXO N° 7

PRUEBAS DE CBR DE LOS SUELOS CON FIBRA DE PET.

	UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA "ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL"										
TESIS: ESTABILIZACION DE SUELOS CON TEREFTALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, Y PUEDA SER UTILIZADO EN LAS CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS											
ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR											
DATOS DE LA MUESTRA											
REALIZADO POR : Br. FERDINAN CCORIMANYA APAZA PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON FIBRA PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS UBICACIÓN : San Miguel - San Sebastian- Cusco DISHCAQ : 04mm+ 0.5%PET											
ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS (CBR) MTC E 132 - 2000											
DATOS DEL MOLDE (cm.)	MOLDE N° 16	MOLDE N° 4	MOLDE N° K	DATOS GENERALES							
	56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES								
Altura	11.70	11.70	11.70	Max. Densidad Seca 2.00							
Diámetro	15.30	15.30	15.3	Humedad Optima 6.44%							
Volumen	2151.1	2151.1	2151.1	Humedad Natural *-							
C DATOS DE COMPACTACION	56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES								
O Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,068	9,110	8,890	Peso del martillo 10 lbs							
M Peso del Molde (gr)	4000	4205	4209	Altura del martillo 18 pulg							
P Peso de la Muestra Compacta (gr)	5,068	4,905	4,681	Número de Capas 5 capas							
A Densidad Humeda (gr/cm3)	2.36	2.28	2.18	Número de golpes 56 capa							
C Densidad Seca (gr/cm3)	2.00	1.95	1.85								
H Peso del Tarro (gr)	38.47	39.90	39.86	40.31	39.81	41.05	Clasificación Suelo				
U Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)	111.50	122.72	125.55	136.75	125.12	124.14					
M Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)	100.26	110.53	113.35	122.95	112.30	111.58					
E Peso del Agua (gr)	11.24	12.19	12.20	13.80	12.82	12.56	SUCS CL				
D Peso del Suelo Seco (gr)	61.79	70.63	73.49	82.64	72.49	70.53	AASTHO : A-4(0)				
A Contenido de Humedad	18.19%	17.26%	16.60%	16.70%	17.69%	17.81%					
D Contenido de Humedad Promedio	17.72%	16.65%	16.65%	16.65%	17.75%	17.75%					
A Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)	9,108	9,189	9,200	9,200	9,200	9,200					
B Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,068	9,110	8,890	8,890	8,890	8,890					
S Porcentaje de Absorción	0.79%	1.61%	1.61%	1.61%	6.62%	6.62%					
E CTE. DIAL EXPANSION	0.001	MOLDE N° 16	MOLDE N° 4	MOLDE N° K	MOLDE N° K	MOLDE N° K					
X FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.
P 24/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%
A 25/03/2016	10.00	24 horas	2.5	0.003	0.05%	10	0.010	0.22%	14	0.014	0.30%
N 26/03/2016	10.00	48 horas	2.5	0.003	0.05%	10	0.010	0.22%	14	0.014	0.30%
S 27/03/2016	10.00	72 horas	2.5	0.003	0.05%	10	0.010	0.22%	14	0.014	0.30%
I 28/03/2016	10.00	96 horas	2.5	0.003	0.05%	10	0.010	0.22%	14	0.014	0.30%
CTE. ANILLO=		MOLDE N° 16	MOLDE N° 4	MOLDE N° K	MOLDE N° K	MOLDE N° K					
P		56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES	12 GOLPES	12 GOLPES					
E TIEMPO	PENETRACION	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	
	(mm) (pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI	
N 0.5 min	0.64 0.025	12	114	38	8	76	25	3	28	9	
T 1.0 min	1.27 0.050	25	238	79	16	152	51	6	57	19	
R 1.5 min	1.91 0.075	43	409	136	28	266	89	7	66	22	
A 2.0 min	2.54 0.100	56	532	177	38	361	120	9	85	28	
C 4.0 min	5.08 0.200	116	1102	367	76	722	241	20	190	63	
I 6.0 min	7.62 0.300	172	1633	544	113	1074	358	29	276	92	
O 8.0 min	10.16 0.400	228	2163	721	160	1519	506	36	342	114	
N 10.0 min	12.70 0.500	284	2692	897	198	1879	626	45	428	143	

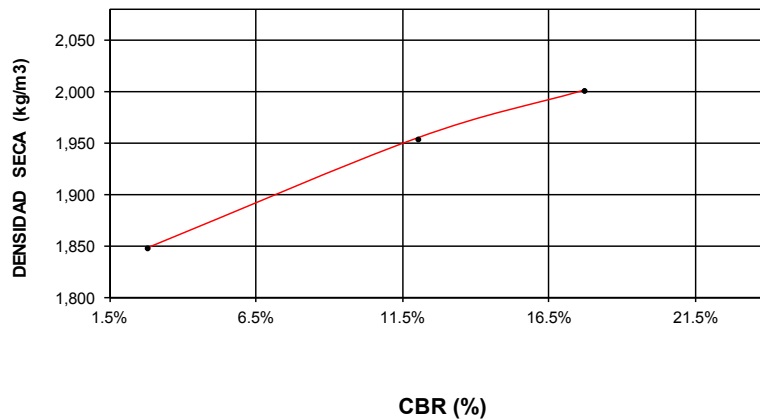
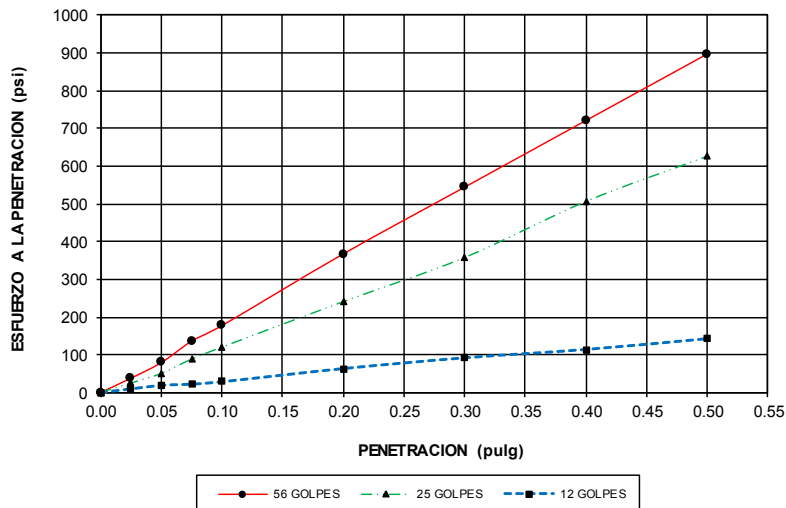


LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

GRAFICOS ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
 PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON FIBRA PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
 UBICACIÓN : San Miguel - San Sebastian- Cusco **DOSIFICACION** : 0.4mm +0.5% PET



RESULTADOS

MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m ³)	2.00	CBR AL 95% DE MDS =	10.3%
HUMEDAD OPTIMA (%)	6.44%	CBR AL 100% DE MDS =	17.7%
Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION:
56 GOLPES	0.05%	0.79%	CBR (0.1") / CBR (0.2") =
25 GOLPES	0.22%	1.61%	0.72
12 GOLPES	0.30%	6.62%	



UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
"ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL"



TESIS: ESTABILIZACION DE SUELOS CON TEREFALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, Y PUEDA SER UTILIZADO EN LAS CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA

TESIS : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS

UBICACIÓN : Huancaro- Santiago- Cusco **DENSIDAD** : 0.5% y 0.4mm de PET

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS (CBR) MTC E 132 - 2000

DATOS DEL MOLDE (cm.)		MOLDE N° M	MOLDE N° 16	MOLDE N° K	DATOS GENERALES							
		56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES								
Altura		11.70	11.70	11.70	Max. Densidad Seca	2.00						
Diámetro		15.29	15.28	15.28	Humedad Optima	12.10%						
Volumen		2148.3	2145.5	2145.5	Humedad Natural							
C DATOS DE COMPACTACION		56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES								
O	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,230	8,884	8,685	Peso del martillo	10 lbs						
M	Peso del Molde (gr)	4368	4150	4082	Altura del martillo	18 pulg						
P	Peso de la Muestra Compacta (gr)	4,862	4,734	4,603	Número de Capas	5 capas						
A	Densidad Humeda (gr/cm3)	2.26	2.21	2.15	Número de golpes	56 capa						
C	Densidad Seca (gr/cm3)	2.00	1.95	1.90								
H	Peso del Tarro (gr)	39.96	38.07	40.49	41.97	40.14	39.60					
U	Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)	139.31	148.98	145.28	146.28	131.75	149.18					
M	Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)	127.90	136.24	132.64	134.50	121.50	136.83					
E	Peso del Agua (gr)	11.41	12.74	12.64	11.78	10.25	12.35					
D	Peso del Suelo Seco (gr)	87.94	98.17	92.15	92.53	81.36	97.23					
A	Contenido de Humedad	12.97%	12.98%	13.72%	12.73%	12.60%	12.70%					
D	Contenido de Humedad Promedio	12.98%		13.22%		12.65%						
A	Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)	9,311		9,009		8,827						
B	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,230		8,884		8,685						
S	Porcentaje de Absorción	1.67%		2.64%		3.08%						
E	CTE. DIAL EXPANSION	0.001	MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K			
X	FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.
P	18/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%
A	19/03/2016	10.00	24 horas	2	0.002	0.04%	3	0.003	0.07%	16	0.016	0.35%
N	20/03/2016	10.00	48 horas	2	0.002	0.04%	3	0.003	0.07%	16	0.016	0.35%
S	21/03/2016	10.00	72 horas	2	0.002	0.04%	3	0.003	0.07%	16	0.016	0.35%
I	22/03/2016	10.00	96 horas	2	0.002	0.04%	3	0.003	0.07%	16	0.016	0.35%
CTE. ANILLO=		MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K				
P			56 GOLPES			25 GOLPES			12 GOLPES			
E	TIEMPO	PENETRACION		Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.
N		(mm)	(pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI
E	0.5 min	0.64	0.025	22	209	70	19	180	60	12	114	38
T	1.0 min	1.27	0.050	42	399	133	30	285	95	26	247	82
R	1.5 min	1.91	0.075	80	760	253	50	475	158	28	266	89
A	2.0 min	2.54	0.100	107	1017	339	75	713	238	45	428	143
C	4.0 min	5.08	0.200	214	2031	677	160	1519	506	90	855	285
I	6.0 min	7.62	0.300	321	3041	1014	235	2229	743	135	1283	428
O	8.0 min	10.16	0.400	428	4048	1349	310	2938	979	180	1709	570
N	10.0 min	12.70	0.500	535	5052	1684	385	3644	1215	225	2135	712

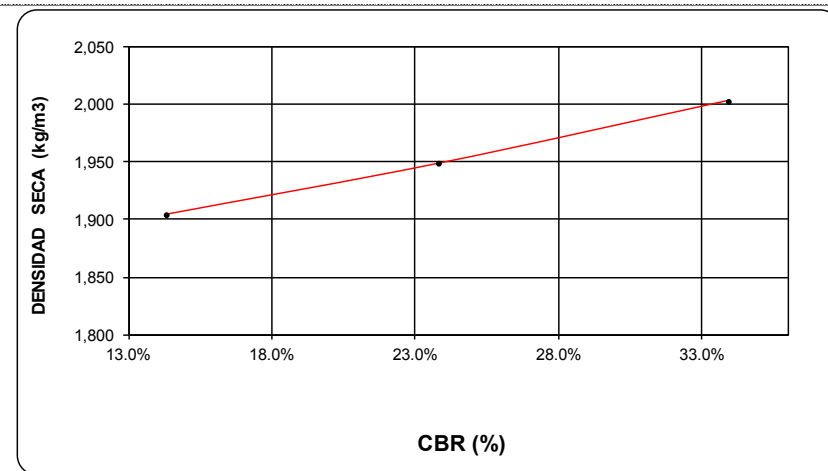
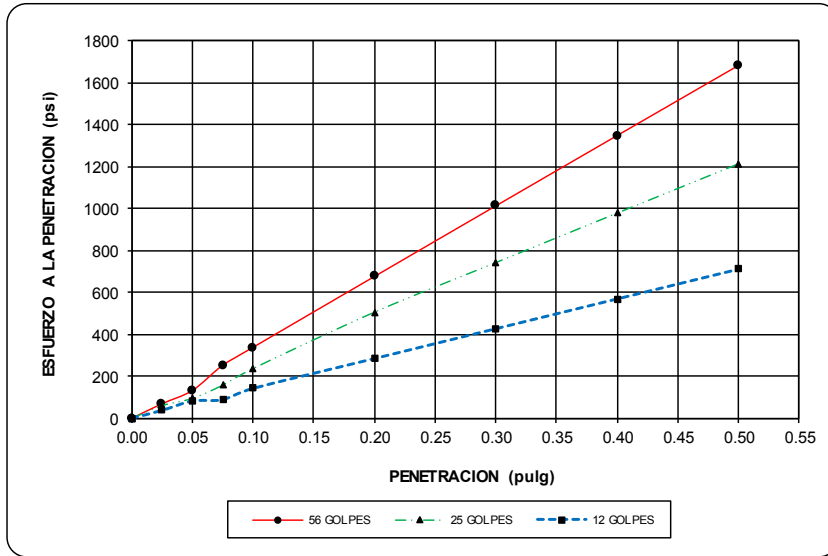


LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

GRAFICOS ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
 NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
 PROYECTO: ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
 UBICACIÓN: Huancaro- Santiago- Cusco **DOSSIAOON** # REF!



RESULTADOS

MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.00	CBR AL 95% DE MDS =	22.8%
HUMEDAD OPTIMA (%)	12.10%	CBR AL 100% DE MDS =	33.9%

Nº GOLFES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION:
56 GOLFES	0.04%	1.67%	CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.75
25 GOLFES	0.07%	2.64%	
12 GOLFES	0.35%	3.08%	



TESIS: ESTABILIZACION DE SUELOS CON TEREFTALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, Y PUEDA SER UTILIZADO EN LAS CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Osoollo Pampa - San Jeronimo - Cusco **DOSIACION** : 0.4 mm - 0.5% PET

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS (CBR) MTC E 132 - 2000

DATOS DEL MOLDE (cm.)		MOLDE N° 16		MOLDE N° 4		MOLDE N° K		DATOS GENERALES				
		56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES						
Altura		11.70		11.70		11.70		Max. Den :	2.02 2.08			
Diámetro		15.30		15.25		15.28		Humedad Optima	12.54%			
Volumen		2151.1		2137.1		2145.5		Humedad Natural	-*.			
C DATOS DE COMPACTACION		56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES						
O	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,240		9,000		9,001		Peso del martillo	10 lbs			
M	Peso del Molde (gr)	4269		4109		4180		Altura del martillo	18 pulg			
P	Peso de la Muestra Compacta (gr)	4,971		4,891		4,821		Número de Capas	5 capas			
A	Densidad Humeda (gr/cm3)	2.31		2.29		2.25		Número de golpes	56 capa			
C	Densidad Seca (gr/cm3)	2.08		2.03		1.99						
H	Peso del Tarro (gr)	39.97	40.74	41.27	40.53	41.96	41.35	Clasificación				
U	Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)	122.35	138.22	120.76	129.56	146.85	149.00	Suelo				
M	Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)	114.32	128.17	112.13	119.39	135.60	136.00					
E	Peso del Agua (gr)	8.03	10.05	8.63	10.17	11.25	13.00	SUCS CL				
D	Peso del Suelo Seco (gr)	74.35	87.43	70.86	78.86	93.64	94.65	AASHTO : A-4(0)				
A	Contenido de Humedad	10.80%	11.49%	12.18%	12.90%	12.01%	13.73%					
D	Contenido de Humedad Promedio	11.15%		12.54%		12.87%						
A	Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)	9,310		9,142		9,200						
B	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)	9,240		9,000		9,001						
S	Porcentaje de Absorción	1.41%		2.90%		4.13%						
E	CTE. DIAL EXPANSION	0.001	MOLDE N° 16			MOLDE N° 4			MOLDE N° K			
X	FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.
P	24/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%
A	25/03/2016	10.00	24 horas	19	0.019	0.41%	20	0.020	0.43%	22	0.022	0.48%
N	26/03/2016	10.00	48 horas	20	0.020	0.43%	21	0.021	0.46%	24	0.024	0.52%
S	27/03/2016	10.00	72 horas	20	0.020	0.43%	21	0.021	0.46%	24	0.024	0.52%
I	28/03/2016	10.00	96 horas	20	0.020	0.43%	21	0.021	0.46%	24	0.024	0.52%
CTE. ANILLO=		MOLDE N° 16			MOLDE N° 4			MOLDE N° K				
P		56 GOLPES			25 GOLPES			12 GOLPES				
E	TIEMPO	PENETRACION		Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.
N		(mm)	(pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI
E	0.5 min	0.64	0.025	15	142	47	10	95	32	3	28	9
T	1.0 min	1.27	0.050	35	333	111	18	171	57	6	57	19
R	1.5 min	1.91	0.075	56	532	177	28	266	89	7	66	22
A	2.0 min	2.54	0.100	73	694	231	40	380	127	9	85	28
C	4.0 min	5.08	0.200	137	1301	434	72	684	228	20	190	63
I	6.0 min	7.62	0.300	197	1870	623	110	1045	348	29	276	92
O	8.0 min	10.16	0.400	270	2560	853	138	1311	437	38	361	120
N	10.0 min	12.70	0.500	343	3249	1083	178	1690	563	47	447	149

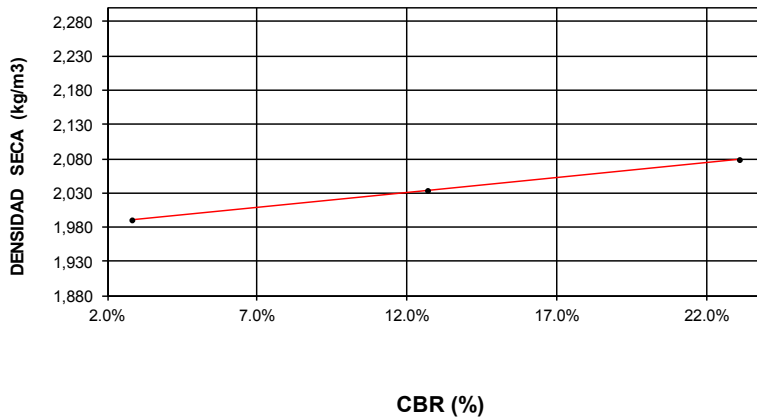
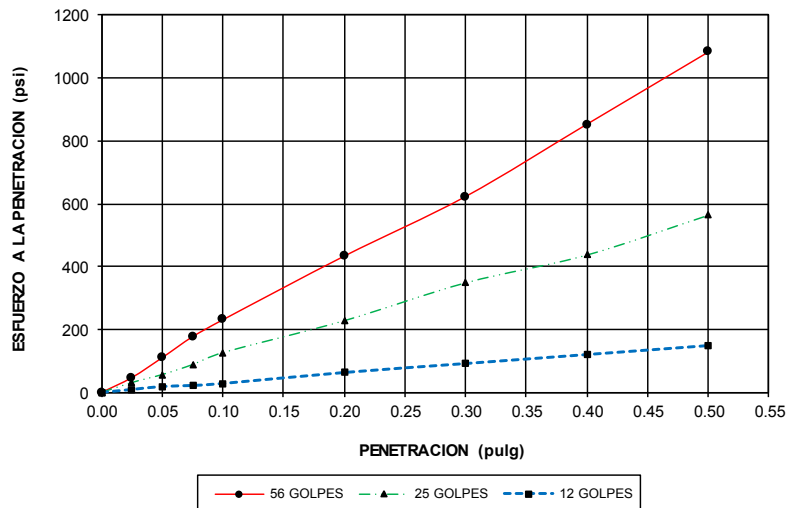


LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

GRAFICOS ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
 NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Oscollo Pampa - San Jeronimo - Cusco **DOSHACION** : 0.4 mm - 0.5%



RESULTADOS

MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.079	CBR AL 95% DE MDS =	12.2%
HUMEDAD OPTIMA (%)	12.54%	CBR AL 100% DE MDS =	23.1%

Nº GOLPES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.80
56 GOLPES	0.43%	1.41%	
25 GOLPES	0.46%	2.90%	
12 GOLPES	0.52%	4.13%	



UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
"ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL"



TESIS: ESTABILIZACION DE SUELOS CON TEREFTALATO DE POLIETILENO – PET PROBADAS EN DIFERENTES CANTERAS DEL CUSCO PARA CONSEGUIR UN AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE CARGA CBR, Y PUEDA SER UTILIZADO EN LAS CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: : Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Pata pata- San Jeronimo - Cusco **DOSIFICACION** natural

ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS (CBR) MTC E 132 - 2000

DATOS DEL MOLDE (cm.)			MOLDE N° M	MOLDE N° 16	MOLDE N° K	DATOS GENERALES						
			56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES							
Altura			11.70	11.70	11.70	Max. Densidad Seca	2.26					
Diámetro			15.28	15.28	15.27	Humedad Optima	9.40%					
Volumen			2145.5	2145.5	2142.7	Humedad Natural						
C DATOS DE COMPACTACION			56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES							
O	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)		9,354	9,356	9,120	Peso del martillo	10 lbs					
M	Peso del Molde (gr)		4029	4186	4149	Altura del martillo	18 pulg					
P	Peso de la Muestra Compacta (gr)		5,325	5,170	4,971	Número de Capas	5 capas					
A	Densidad Humeda (gr/cm3)		2.48	2.41	2.32	Número de golpes	56 capa					
C	Densidad Seca (gr/cm3)		2.26	2.18	2.09							
H	Peso del Tarro (gr)		37.78	40.07	40.60	41.28	40.50	34.70	Clasificación Suelo			
U	Peso del Tarro + Suelo Humedo (gr)		134.22	144.56	137.23	144.03	140.10	138.92				
M	Peso del Tarro + Suelo Seco (gr)		126.00	135.15	128.03	134.55	130.36	128.65	SUCS ML AASTHO A-4 (3)			
E	Peso del Agua (gr)		8.22	9.41	9.20	9.48	9.74	10.27				
D	Peso del Suelo Seco (gr)		88.22	95.08	87.43	93.27	89.86	93.95				
A	Contenido de Humedad		9.32%	9.90%	10.52%	10.16%	10.84%	10.93%				
D	Contenido de Humedad Promedio		9.61%		10.34%		10.89%					
A	Peso M+M C. despues de Inmersión (gr)		9,400		9,410		9,263					
B	Peso del Molde y Muestra Compacta (gr)		9,354		9,356		9,120					
S	Porcentaje de Absorción		0.86%		1.04%		2.88%					
E	CTE. DIAL EXPANSION		0.001	MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K		
X	FECHA	HORA	EMPO TRAN	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.	Dial	Pulg.	% Exp.
P	18/03/2016	10.00	00 horas	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%	0	0.000	0.00%
A	19/03/2016	10.00	24 horas	1	0.001	0.02%	0	0.000	0.00%	4	0.004	0.09%
N	20/03/2016	10.00	48 horas	1	0.001	0.02%	1	0.001	0.02%	4	0.004	0.09%
S	21/03/2016	10.00	72 horas	1	0.001	0.02%	1	0.001	0.02%	4	0.004	0.09%
I	22/03/2016	10.00	96 horas	1	0.001	0.02%	1	0.001	0.02%	4	0.004	0.09%
CTE. ANILLO=			MOLDE N° M			MOLDE N° 16			MOLDE N° K			
P			56 GOLPES			25 GOLPES			12 GOLPES			
E	TIEMPO	PENETRACION		Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.	Dial	Carga	Esfuer.
N		(mm)	(pulg)		Lb	PSI		Lb	PSI		Lb	PSI
E	0.5 min	0.64	0.025	30	285	95	15	142	47	13	123	41
T	1.0 min	1.27	0.050	50	475	158	29	276	92	20	190	63
R	1.5 min	1.91	0.075	80	760	253	52	494	165	26	247	82
A	2.0 min	2.54	0.100	111	1055	352	69	656	219	31	295	98
C	4.0 min	5.08	0.200	219	2078	693	139	1320	440	62	589	196
I	6.0 min	7.62	0.300	330	3126	1042	208	1974	658	93	884	295
O	8.0 min	10.16	0.400	441	4171	1390	277	2626	875	124	1178	393
N	10.0 min	12.70	0.500	552	5211	1737	346	3277	1092	155	1472	491

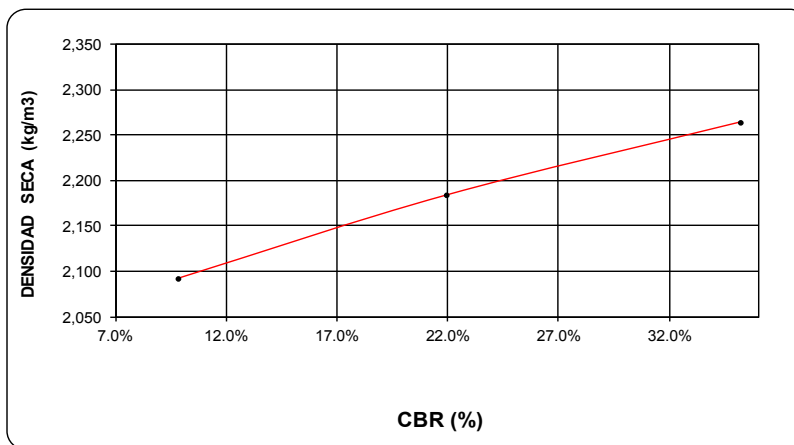
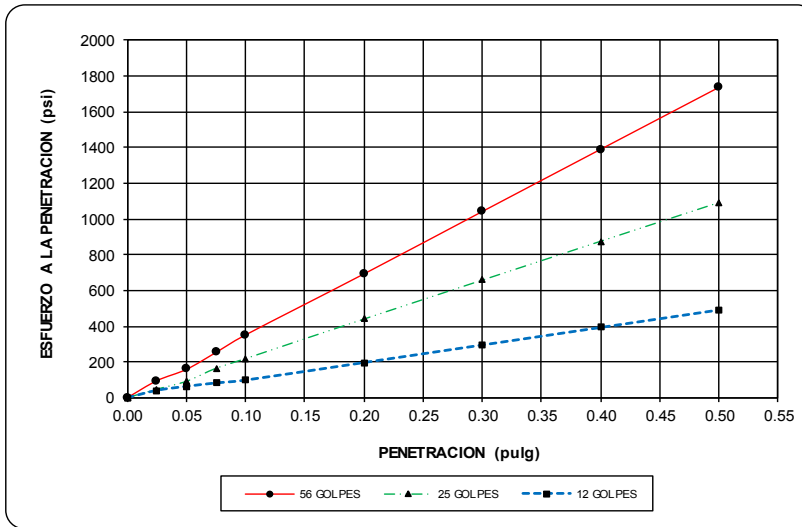


LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

GRAFICOS ENSAYO DE VALOR SOPORTE DE LOS SUELOS CBR
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.145

DATOS DE LA MUESTRA

REALIZADO POR: Br: FERDINAN CCORIMANYA APAZA
PROYECTO : ESTABILIZACION DE SUELOS CON PET PARA CAPAS INFERIORES DEL PAVIMENTO PARA CARRETERAS
UBICACIÓN : Pata pata - San Jeronimo - Cusco **DOSEACION** natural



RESULTADOS

MAXIMA DENSIDAD SECA(kg/m3)	2.264	CBR AL 95% DE MDS =	21.2%
HUMEDAD OPTIMA (%)	9.40%	CBR AL 100% DE MDS =	35.2%

Nº GOLFES	(%) EXPANSION	(%) ABSOR.	VERIFICACION DE RESULTADOS, RELACION: CBR (0.1") / CBR (0.2") = 0.76
56 GOLFES	0.02%	0.86%	
25 GOLFES	0.02%	1.04%	
12 GOLFES	0.09%	2.88%	

ANEXO 8

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL SITIO SUELO DE LA ZONA DE SAN MIGUEL



UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL SITIO SUELO DE LA ZONA DE HUANCARO



